



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH REPLIKOVANÉ VÝROBY ZVOLENÉHO DÍLU A
VERIFIKACE TVARU A ROZMĚRŮ ZA VYUŽITÍ
OPTICKÝCH METOD 3D SKENOVÁNÍ**

DESIGN OF REPLICATED PRODUCTION OF THE SELECTED PART AND VERIFICATION OF SHAPE AND
DIMENSIONS USING OPTICAL 3D SCANNING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Šrenk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jakub Šrenk**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Slaný, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a kúšebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh replikované výroby zvoleného dílu a verifikace tvaru a rozměrů za využití optických metod 3D skenování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řešení zvoleného tématu předpokládá výběr tvarově složité součásti, která bude prvotně vytvořena jako CAD model a následně bude navržena kusová výroba daného dílu. V rámci zpracování daného tématu se také předpokládá provedení rozměrové analýzy nově vytvořeného master modelu vůči skenu. Dálším bodem řešení bude navržení vhodné výrobní technologie s ohledem na funkční vlastnosti dílu a na kusovost výroby.

Cíle bakalářské práce:

1. Charakteristika problematiky technologií reverzního inženýrství a rapid prototyping (RP).
2. CAD návrh zvolené součásti.
3. Návrh technologie pro tvorbu Master modelu.
4. Verifikace tvaru a rozměru CAD dat vůči Master modelu a finálnímu výrobku.

Seznam doporučené literatury:

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford University Press, 2005. pp. 651. ISBN 0-19-514206-3.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástrojů. VŠ skriptum. Brno: CERM, 2006. 230 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

SEDLÁK, J. a PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.

ROZKOŠNÝ, L. Jak vyrobit plně funkční kovové díly přímo z 3D CAD dat. [online]. Únor 2008.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018

		
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu		doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá výrobou prototypového odlitku z pryskyřice s použitím technologie reverzního inženýrství a rapid prototyping. Ve výrobě byla také optimalizována kvalita povrchu a rozměrová přesnost. V teoretické části je rozebrána technologie 3D skenování, rapid prototyping, soft tooling a dokončovací metody. V praktické části je podrobně rozebrán výrobní proces zvolené součásti pro replikovanou výrobu. Při výrobě bylo použito 3D skenování, aditivní technologie, soft tooling a dokončovací metody úpravy povrchu. V posledním kroku je vyhodnocena rozměrová přesnost a také byla zvolena technologie pro sériovou a kusovou výrobu.

Summary

This work is engaged in the prototype casting of resin with usage of reverse engineering technology and rapid prototyping. Surface quality and dimensional accuracy was optimized in a production process. The technology of 3D scanning, rapid prototyping, soft tooling and finishing methods is discussed in the theoretical part. Then in the practical part there is analyzed manufacturing process of the selected component for replicated production. 3D scanning, additive technology, soft tools and surface finishing methods were used in the manufacturing process. In the last step, the dimensional accuracy is evaluated and also the technology for serial and piece production was chosen.

Klíčová slova

3D skenování, reverzní inženýrství, rapid prototyping, soft tooling, povrchová úprava

Keywords

3D scanning, reverse engineering technology, rapid prototyping, soft tooling, surface finishing

ŠRENK, J. *Návrh replikované výroby zvoleného dílu a verifikace tvaru a rozměrů za využití optických metod 3D skenování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Slaný, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma NÁVRH REPLIKOVANÉ VÝROBY ZVOLENÉHO DÍLU A VERIFIKACE TVARU A ROZMĚRŮ ZA VYUŽITÍ OPTICKÝCH METOD 3D SKENOVÁNÍ vypracoval samostatně s pomocí odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, která tvoří přílohu této práce.

V Brně 22.5.2019

Jakub Šrenk

Tímto děkuji panu Ing. Martinovi Slanému, Ph.D. za podnětné připomínky a cenné rady, se kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům a blízkým za to, že mě podporovali.

Jakub Šrenk

Obsah

Úvod	3
Cíle	3
Teorie	4
1 Reverzní inženýrství	4
2 3D skenování - Digitalizace	4
2.1 Rozdělení metod digitalizace	4
2.2 Skupiny digitalizace	5
3 Rozdělení dle působení na digitalizovaný objekt	5
3.1 Destruktivní metoda	5
3.2 Nedestruktivní metoda	5
4 3D skenery	5
4.1 Rozdělení 3D skenerů	6
4.2 Kontaktní skenery	6
4.3 Destruktivní skenery	7
4.4 Bezkontaktní skenery	7
4.5 Optické skenery	7
4.6 Laserové skenery	8
4.7 Ultrazvukové skenery	9
4.8 Rentgenové skenery	10
5 Rapid prototyping	10
5.1 Výroba z fotopolymerů	11
5.2 Výroba z práškových materiálů	13
5.3 Výroba z tuhých materiálů	16
5.4 Dokončovací operace a úprava povrchu prototypu	17
6 Soft tooling	19
Praktická část	21
7 Základní charakteristika součásti	21
8 3D skenování pomocí softwaru GOM skeneru	21
9 Převod skenu do 3D modelu	24
9.1 Úprava skenu v GOM Inspect 2018	24
9.2 Úprava 3D modelu v softwaru CATIA	26
10 Rapid prototyping	27
10.1 Výroba Master modelu pomocí FDM technologie	27
10.2 Výroba Master modelu pomocí DLP technologie	28
10.3 Post processing a příprava jádra pro formu na odlitek	30
10.4 Výroba zvoleného dílu pomocí soft tooling	31
10.5 Post processing	35
11 Rozměrová analýza dokončených sošek	37
11.1 3D skenování dokončených sošek	37
11.2 Proces vyhodnocení odchylek rozměrů v GOM Inspect 2018	38
11.3 Rozměrová analýza vytištěné finální sošky	38
11.4 Rozměrová analýza odlité finální sošky	39

11.5	Porovnání tištěné a odlité finální sošky	39
12	Zhodnocení výrobního procesu	40
Závěr		42
Seznam použitých zdrojů		42
Seznam použitých zkratk a symbolů		46

Úvod

Návrh replikované výroby je častou otázkou u dílů, které se již nevyskytují na trhu. Jsou to například součásti historických vozidel. Z důvodu již neexistujících výrobních linek na výrobu starších dílů je jedinou možností replikovaná výroba. Proto byla zvolena soška automobilové značky Jaguar. Dalším důvodem, proč byla zvolena tato součástka, byla tvarová složitost dílu. Pro obnovení výroby sošky byly použity pokročilé metody a technologie.

Reverse engineering (RE) je jednou z použitých metod. Zatímco principem klasické výroby součástky je transformace nehmotného 3D modelu do podoby finálního výrobku. Reverse engineering představuje přesně opačnou cestu. Z fyzické součásti chceme získat počítačová 3D data pro následnou analýzu nebo pro obnovení výroby.

Rapid prototyping (RP) je další použitou metodou. RP je pojem, který je moderním trendem na poli navrhování součástí a při kusové výrobě replikovaných dílů pomocí 3D tiskáren. RP v doslovném překladu znamená "rychlé prototypování". 3D tisk využívá převážně aditivní technologii, která materiál postupně nanáší, nikoliv odebírá. Proto byla pro výrobu dílu použita metoda FDM (Fused Deposition Modelling) a DLP (Digital Light Processing). Někdy je třeba vyrobit prototypových kusů více. Zde už není rapid prototyping tak časově výhodný, ale ukázalo se, že může být využit v procesu soft tooling. Tento pojem označuje výrobu forem ze silikonu na voskové a pryskyřicové odlitky.

U těchto nekonvekčních metod je dobré vědět, jak moc se finální výrobky odlišují od původního dílu. Z tohoto důvodu je provedena rozměrová analýza ve speciálním počítačovém programu.

Cíle

- Naskenování zvolené součásti pomocí 3D skeneru.
- Vytvoření CAD modelu.
- Výroba replikovaného dílu pomocí technologie rapid prototyping a soft tooling.
- Volba dokončovacích metod.
- Rozměrová analýza a porovnání původního součásti s nově vyrobenou replikovanou součástí.
- Volba technologie pro kusovou a sériovou výrobu.

Teorie

1 Reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství je technologie, která je charakteristická opačným průběhem činností než klasická výroba. Bývá označováno jako zpětné inženýrství. Tato metoda je využívána na obnovení výroby dílu, který již není na trhu dostupný. Cílem metody je sestavit stejný nebo podobně fungující předmět.

Z již existující fyzické součásti je vytvořen 3D CAD model pomocí 3D skenerů a následně je dále zpracováván. Technologie je využívána na optimalizaci výroby, ke kontrole vnějšího povrchu zkoumaného dílu, k výzkumu nebo ve stavebnictví k rekonstrukci historických staveb [1, 2].

Schématický postup reverzního inženýrství je znázorněn na obrázku 1.



Obrázek 1: Reverzní inženýrství [1]

2 3D skenování - Digitalizace

Metoda 3D skenování se zabývá převodem reálného povrchu do digitální podoby. Zařízení snímající objekt převede reálný objekt do takzvaného "mračna bodů". Obraz je nejprve kvantován a následně vzorkován. Vzorkování je zaznamenávání hodnot - vzorků v předem daných intervalech. Protože vzorky obsahují velké množství informací, je nutné obraz kvantovat. Kvantování je proces jednorozměrné úrovně diskretizace. Cílem této metody je získat digitální obraz snímané součásti [1, 2, 3, 4].

Pro převod fyzické součásti do 3D CAD modelu jsou používány 3D skenery, které se dělí do několika podskupin podle různých kritérií. 3D model je nutné upravit, protože při převodu dat mohou nastat chyby například může dojít ke ztrátě části původní informace funkce snímku nebo nasnímání okolního prostředí, které je nutné následně odstranit. Chyby jsou také způsobeny povrchovými vlastnostmi digitalizovaného objektu, jako je například barva povrchu, drsnost, lesklost a jeho složitost [1, 2].

3D skenování je využíváno ve firmách s různým zaměřením. Slouží například pro rozměrovou kontrolu a replikovanou výrobu. Digitalizace je dostupnou metodou i do domácností. Příkladem chytrých technologií v domácnostech jsou aplikace na digitalizaci reálných objektů pomocí fotoaparátu v chytrém telefonu.

2.1 Rozdělení metod digitalizace

Digitalizace je rozšířenou metodou. Jelikož existuje mnoho různých typů 3D skenerů, které slouží k digitalizaci a zpracování dat zkoumaného objektu, je nutné metody klasifikovat [1, 2, 5].

Rozdělení digitalizace lze pojmut podle různých kritérií. Například se může jednat o rozdělení dle působení na zkoumaný objekt, způsobu digitalizace nebo dle použité technologie [1, 2, 5].

2.2 Skupiny digitalizace

2D digitalizace

Naskenovaný objekt je převeden do dvourozměrného formátu. Finální produkt skenování je výkres nebo fotografie, které mohou být poskládány do animace. Z 2D obrazů, ve kterých se nachází nárys, půdorys a bokorys, může být poskládán 3D model. Následnou vektorizací můžeme získat ortogonální pohledy na skenovaný model [1, 2, 5].

3D digitalizace

Naskenovaný objekt je převeden do třírozměrného formátu. Obraz je vytvořen z mnoha bodů, které jsou uspořádány v prostoru s přesně danými souřadnicemi. Tyto body jsou nazývány jako tzv. „mrak bodů“. Mrak bodů, který se skládá z bodů, tvoří v síti trojúhelníky a je nutné je editovat, protože obraz obsahuje naskenované okolí nebo se jednotlivé obrazy nesloží správně [1, 2, 5].

Pro převod povrchu tělesa na objemové těleso jsou používány programy pro jejich editaci. Při skenování je získáván pouze povrch tělesa, a proto je nutné provést další úpravy modelu, aby z tzv. „mrtvého modelu“ mohl být získán plnohodnotný 3D CAD model [1, 2, 5].

3 Rozdělení dle působení na digitalizovaný objekt

3.1 Destruktivní metoda

Destruktivní metoda je založena na skenování vnějších i vnitřních stran skenovaného objektu bez ohledu na zachování objektu. Díl je zničen za účelem zkoumání vnitřní geometrie. Metoda je používána na tvarově složité díly [1, 2].

3.2 Nedestruktivní metoda

Nedestruktivní metodou je 3D skenování, při kterém nedochází k narušení nebo zničení zkoumané součásti. Nelze ji použít pro díly s hlubokými otvory. Nedestruktivní 3D skenování je používáno na naskenování pouze vnějšího povrchu zkoumaného modelu [1, 2].

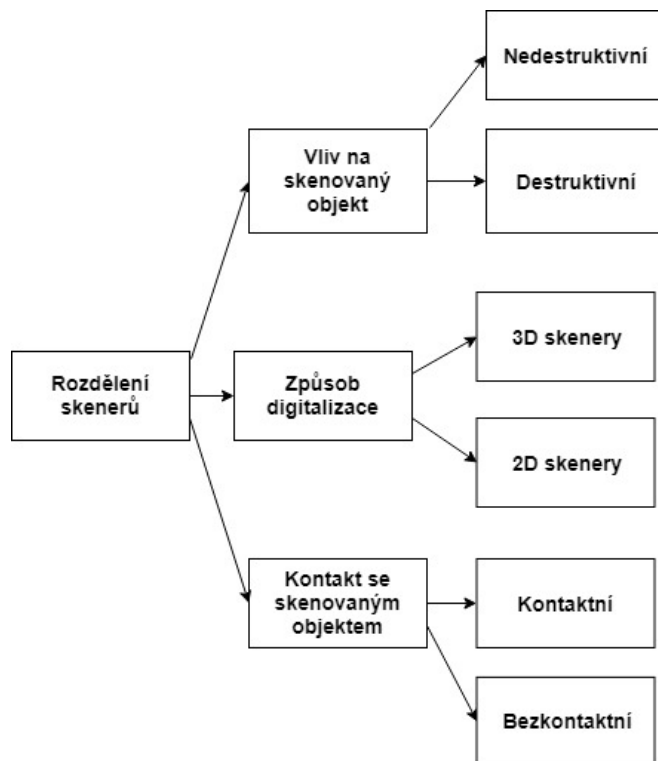
4 3D skenery

3D skenery slouží pro zachycení tvarů a struktury vnějšího povrchu reálných objektů a přenesení do 3D CAD modelu pomocí bezdotykových nebo dotykových skenerů. Na snímání se využívají kamery, magnetické mikrotomografy, lasery a dotykové snímače. Nejčastěji jsou používány nedestruktivní metody snímání, které neporuší zkoumaný díl, jenž je zkoumané díly jsou často unikátní a nenahraditelné [1, 5, 6, 7].

3D skenery jsou využívány například ve filmařském průmyslu, v reversním inženýrství, pro průmyslový design nebo pro renovaci historických předmětů [1, 5, 6, 7].

4.1 Rozdělení 3D skenerů

Skenery jsou rozděleny dle mnoha kritérií např.: Dle způsobu zpracování dat, dle kontaktu se skenovaným objektem nebo dle principu činnosti. Rozdělení je znázorněno na obrázku 2.

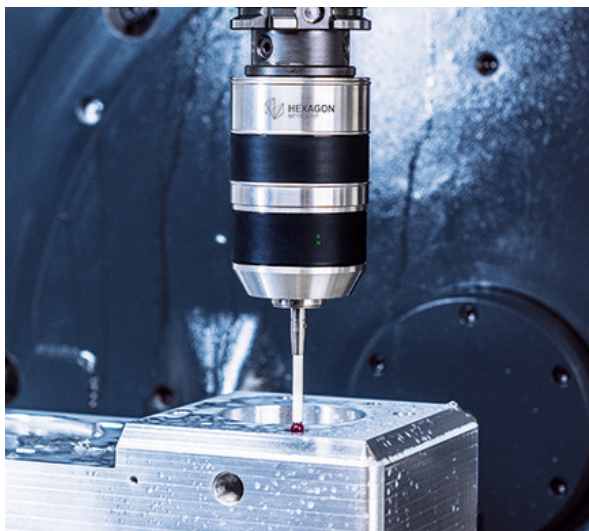


Obrázek 2: Obecné rozdělení 3D skenerů[1]

4.2 Kontaktní skenery

Kontaktní skenery jsou založeny na dotyku snímače s povrchem zkoumané součásti. Tato metoda využívá kontaktní sondu k snímání reálného objektu, která je uchycena na rameni nebo v CNC stroji. Pro získání 3D obrazu zkoumané součásti je nutné nasnímat několik bodů na povrchu zkoumaného dílu. Čím více bodů je nasnímáno, tím přesnější obraz je dosažen. Mezi tyto skenery jsou zařazeny 3D digitizéry a stacionární souřadnicové měřicí systémy, rozšířeny ve firmách se zaměřením na kovoobrábění [1, 5].

Na obrázku 3 je znázorněn dotykový skener značky M and H Rádiová dotyková sonda RWP20.41. Tento skener slouží ke zkoumání a skenování vnějšího povrchu zkoumané součásti upnuté v CN stroji.



Obrázek 3: Dotyková sonda RWP20.41 [8]

4.3 Destruktivní skenery

Tato technologie je schopna skenovat vnější povrchy součástí, ale také vnitřní geometrii. Destruktivní skenování je využíváno převážně na součásti se složitou vnitřní geometrií. Zkoumaný díl je umístěn na nastavitelný rám a následně je na něj nanášena vrstva speciálního přídavného materiálu, aby byly snímky čitelné. Pomocí vakua se přílnavý materiál rozprostře po celém povrchu zkoumané součásti. Tento díl je obráběn pomocí frézky, která odfrézovává tenké vrstvy v rozmezí desetin až setin milimetru, a poté je skenován optickým skenerem. Ze snímků naskenovaných vrstev je následně složen pomocí softwaru 3D CAD model [1, 5].

4.4 Bezkontaktní skenery

Při bezkontaktním skenování nedochází ke kontaktu se zkoumaným objektem, a proto ani k porušení povrchu skenovaného objektu.

Tato metoda využívá optické zařízení nebo zařízení, které vydává vlnění k nasnímání povrchu reálného objektu, jako je například laser. Tento typ je používán pro snímání součástí, které jsou z elastických materiálů, u kterých by hrozila deformace při dotyku sondy, a tím by byl objekt nasnímán nepřesně. Deformace by mohla nastat u dílů z polymerů nebo pryže. Výhodou bezkontaktních skenerů je čas snímání, neboť je to méně časově náročné oproti kontaktním skenerům [5, 7, 9].

4.5 Optické skenery

Tato technologie je založena na principu snímání zkoumaného objektu pomocí optického zařízení z několika úhlů. Natočení je prováděno buď ručně, pokud jde o ruční skener, nebo pomocí automatického otočného stolu. Před snímáním je na díl nanesen titanový prášek nebo jakýkoliv jiný prášek, který zamezí odleskům ze zkoumaného povrchu součásti, a následně jsou nalepeny referenční body (orientační body) kvůli přesnějšímu skládání snímků v CAD modelu. Velikosti těchto bodů se liší podle velikosti snímaného objektu.

CAD model je tvořen pomocí nasnímaných bodů, polygonů a geometrických entit. Optické skenery jsou využívány pro tvorbu 3D modelu, design nebo pro měření při výrobě ve strojírenství [5, 7, 9].

Na obrázku 4 je znázorněn optický skener značky GOM. Tento skener slouží ke zkoumání a skenování vnějšího povrchu zkoumané součásti.



Obrázek 4: Skener značky GOM Atos Compact 2

4.6 Laserové skenery

Laserové skenery jsou založeny na principu vysílání laserového paprsku kolmo proti skenovanému objektu. Paprsek je odražen od povrchu objektu zpět do skeneru a následně je vyhodnocen pomocí softwaru. Geometrie povrchu snímané součásti je získána pomocí úhlu, pod kterým se vrací odražený paprsek. Po ukončení skenování je softwarem vytvořena síť bodů v polygonech. Kvalita 3D CAD modelu je dána počtem naskenovaných bodů. Tato metoda je vysoce přesná, a proto se využívá například při kontrole výroby [5, 10].

Na obrázku 5 je znázorněn laserový skener značky Faro, jenž slouží ke skenování stavebních konstrukcí.



Obrázek 5: Laserový 3D skener Faro [11]

4.7 Ultrazvukové skenery

Ultrazvukový skener je jeden z typů bezkontaktního snímání pomocí ultrazvukové sondy. Skenování je prováděno manuálně (ručně) pomocí ručních skenerů s kovovým hrotem, které jsou přikládány na zkoumaný objekt. Ultrazvuková sonda vysílá ultrazvukové vlny (UZ) a následným zpracováním UZ vznikne 3D CAD model. Nevýhodou tohoto typu je nízká přesnost, která je od 0,3 mm do 0,5 mm. Tato technologie slouží ke kontrole a vyhledávání vad v kovových materiálech v hutním průmyslu. Ve strojírenství se moc nepoužívá, a proto se využívá pro skenování méně náročných dílů. Tuto metodu lze využít i u nekovových materiálů, jako jsou například plasty nebo keramika. Výhodou je nízká cena 3D skeneru a dostupnost na trhu. [5, 12].

Na obrázku 6 je znázorněn ultrazvukový skener značky Krautkrämer USM 25. Tento skener slouží ke zkoumání vnitřních objemových vad, jako jsou například praskliny, bubliny nebo póry.



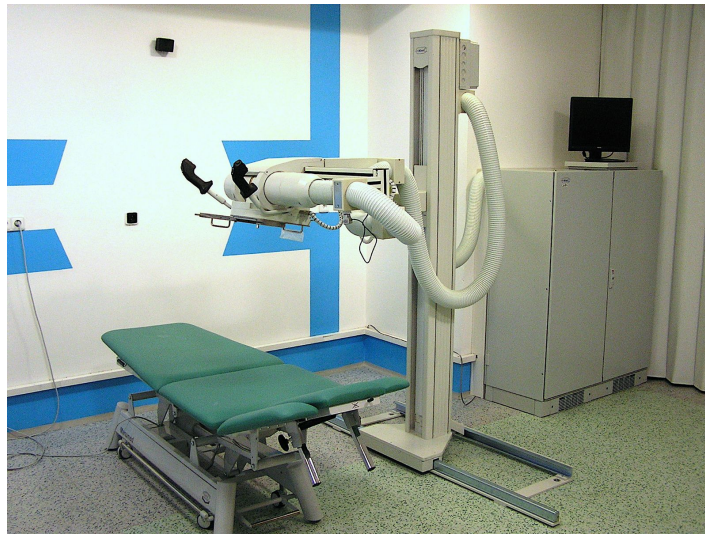
Obrázek 6: Ultrazvukový měřicí přístroj značky Krautkrämer USM 25[13]

4.8 Rentgenové skenery

Rentgenové skenování je jedna z nedestruktivních metod pro zkoumání vnitřní geometrie. Pro měření oproti lékařským rentgenům se používá větší intenzita záření se ve strojích je tento typ používán například pro kontrolu uzavřených nádob [1, 5].

Tato technologie je využívána v lékařství ve formě rentgenových skenerů a počítačových tomografií. Počítačové tomografy (CT) se využívají k detailnímu pozorování stavby těla. CT se liší od rentgenů počítačovým zpracováním. Data z CT jsou zpracovávány počítačem na základě snímků mnoha vrstev. [14].

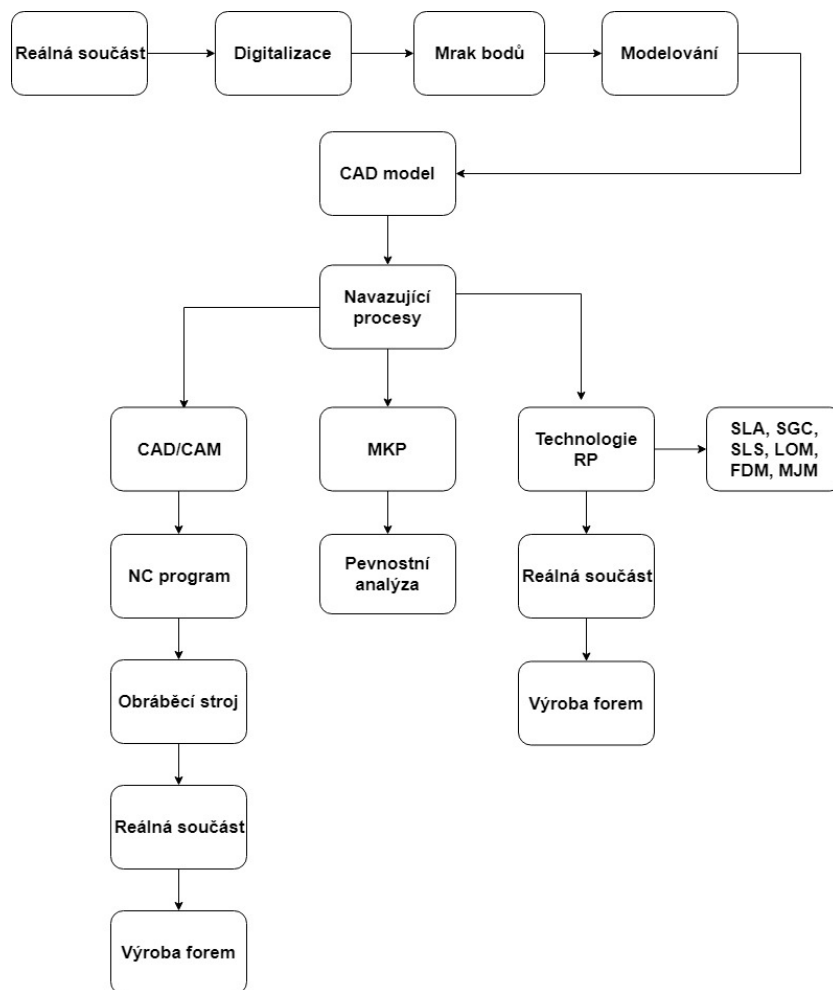
Na obrázku 7 je znázorněn lékařský terapeutický rentgen Wolf T 200. Tento rentgen používají v Chebské nemocnici.



Obrázek 7: Terapeutický rentgen značky Wolf T 200[15]

5 Rapid prototyping

Tato technologie umožňuje vytvářet vnější a vnitřní tvary součástí. Princip této technologie je založen na nanášení materiálu po vrstvách určité tloušťky, čímž se liší od obrábění, neboť nedochází k odebírání materiálu pomocí řezného nástroje. Aditivní technologie je vhodná pro kusovou výrobu neboli pro prototypovou výrobu. Pro prototypovou výrobu jsou použity různé materiály jako například fotopolymery, termoplasty, vosk i kovový prášek podle použité technologie. Rapid prototyping je nejčastěji využíván k odhalení chyb ve výrobní dokumentaci, pro úsporu výrobních nákladů než je zavedena sériová výroba, pro zkrácení výrobních časů, pro vizualizaci, nebo kvůli ověření vyrobiteľnosti. Schéma vývoje a procesu vzniku reálné součásti se nachází na obrázku 8 [1, 2, 16, 17].



Obrázek 8: Vývoj a proces vzniku reálné součásti dle [1]

Tabulka 1: Technologie rapid prototyping dle [1]

Základní technologie rapid prototyping	Zkratka	Materiál modelu
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, vosk, kovový prášek
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonat
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer
Electron Beam Melting	EBM	Kovové prášky

5.1 Výroba z fotopolymerů

Tento typ je založen na výrobě z pryskyřice, která je reaktivní na UV záření. Tekutá pryskyřice (UV resin) je umístěna v nádobě s průhledným dnem, kde pod hladinou dochází k vytvrzování jednotlivých vrstev pomocí LCD displeje nebo pomocí laseru. Po nanesení první vrstvy je ustálena hladina pryskyřice a následně jsou nanášeny další vrstvy. Po do-

končení tisku je vytvořen celý 3D model, který musí být očištěn od přebytečné pryskyřice a následně vytvrzen pomocí UV světla [16, 18, 19, 20].

Stereolitografie - SLA

Stereolitografie (SLA) je jednou z nejpřesnějších aditivních metod prototypové výroby. Pryskyřice, která je používána pro výrobu, je UV resistivní kapalina, která reaguje (tvrdně) na laserový paprsek. Výroba tištěného dílu je založena na vrstvení jednotlivých 2D vrstev. Tloušťka jedné vrstvy je tvořena 0,05 až 0,2 mm pryskyřice. Objekt je tištěn na desku, která je posouvána o vzdálenost tloušťky tištěné vrstvy před tvořením další vrstvy. Některé typy SLA tiskáren mají stírací lištu, která vyrovnává hladinu tekuté pryskyřice pro zamezení defektů a pro zvýšení přesnosti tisku. Jednou z výhod je možnost výroby modelů s velkými detaily, malými otvory a složitou geometrií. Z tohoto důvodu je používána pro výrobu jader do forem pro lítí nebo pro vstřikování plastů [16, 18, 19, 20].

Před začátkem tisku je potřebné připravit program pro tisk, umístit vyráběný objekt a nastavit podpůrný materiál. STL model požadované součásti pro tisk je rozřezán na 2D vrstvy a následně je vygenerován výrobní program. Po ukončení tisku je nutné výtisk očistit pomocí isopropylalkoholu a následně je vytištěný díl vytvrzen pomocí UV světla. S touto metodou je spjato mnoho výhod, jako je například možnost výroby objemnějších dílů, velká přesnost a široký výběr materiálů. Nevýhodou je složitost úpravy povrchu a sušení [16, 18, 19, 20].

Na obrázku 9 je 3D tiskárna značky Anycubic Photon, jež je cenově dostupná 3D DLP tiskárna trhu.



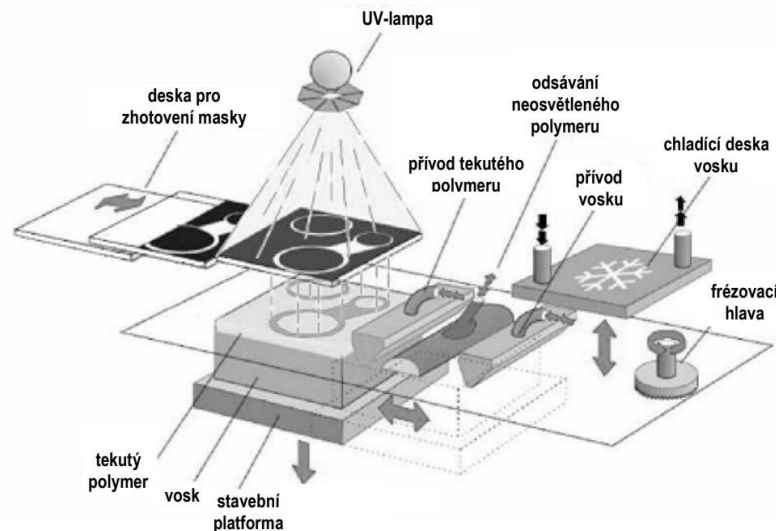
Obrázek 9: 3D tiskárna Anycubic PHOTON

Solid Ground Cutting - SGC

Proces výroby je založen na nanášení tenkých vrstviček speciálního toneru z fotopolymerní pryskyřice na nosnou desku, nad kterou je umístěna UV lampa se šablonou,

která vytvrzuje pryskyřici. Tyto vrstvy 3D modelu mohou být tištěny s různou tvrdostí ovlivněnou příměsí pryže. Při tisku jednotlivých vrstev je přebytečná pryskyřice vakuově odsávána a na místo ní je nanesen roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpůrný materiál. Tento proces je opakován do vytvoření celé tištěné součásti. Dokončená součást je vytvrzována pomocí UV lampy, aby vyrobený díl měl požadovanou tvrdost. Poté jsou odstraněny podpory a přebytečný materiál ve formě [16, 18, 20].

Na obrázku 10 je znázorněno schéma technologie SGC.



Obrázek 10: Schéma technologie SGC dle [1]

5.2 Výroba z práškových materiálů

Selective Laser Sintering - SLS

Technologie SLS, která využívá pro výrobu součástí práškový materiál. Tato metoda je založena na nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Materiál v práškové podobě o tloušťce 20 až 100 µm je natavován pomocí CO₂ laseru. Podporový materiál je tvořen přebytečným práškovým materiálem, který není odstraňován. SLS metoda je používána na výrobu dílů z plastu, pryže, kovu nebo keramiky tedy pro výrobu forem, pro výrobu prototypů a pro malosériovou výrobu. Díly vyrobené touto metodou jsou pevné, ale naopak energeticky náročné na výrobu a mají nízkou kvalitu povrchu [16, 18].

Na obrázku 11 je znázorněno odstraňování přebytečného materiálu z vyrobeného dílu.



Obrázek 11: Odstraňování přebytečného materiálu z vyrobeného dílu [21]

Direct Metal Laser Sintering - DMLS

Metoda DMLS je založena na postupném tavení kovového prášku nanášeného v nízkých vrstvách pomocí laserového paprsku (laser sintering). Tloušťka jedné vrstvy je v rozmezí 0,02 mm až 0,04 mm. Vyráběný díl je rozřezán pomocí speciálního počítačového softwaru na tenké vrstvičky tzv. 2D obrazy. Tato data jsou poslána do 3D tiskárny, kde jsou na ocelovou pracovní platformu nanášeny rovnoměrné vrstvičky prášku, které jsou vytvrzovány pomocí laseru. Ocelová platforma je používána, protože dobře odvádí teplo. Prášek, který není spotřebován pro výrobu, je z 98 % použit znovu. Po dokončení tisku je nutné odstranit podpory a udělat povrchovou úpravu, jako jsou například broušení, leštění nebo obrábění. Díly vyrobeny DMLS metodou jsou pevnější než odlitky a výkovky [16, 18].

Typy používaných materiálů ve formě kovového prášku dle [1]:

- korozivzdorná ocel EOS GP 1
- martenzitická ocel EOS MS 1
- slitina bronz-nikl DM 20
- ocel DS 20
- kobalt Chrom EOS CC MP 1
- titan EOS Ti 64 / Ti64ELI

Metoda DMLS je využívána v leteckém, v automobilovém, v elektronickém průmyslu a v kosmonautickém, protože je považována za přesnou a rychlou výrobu plně funkčních prototypových dílů. Tato technologie je často kombinována s tradičními výrobními postupy například při výrobě formy. Tyto tzv. hybridní kombinace jsou často používány z ekonomických důvodů. Výhodou součástí vyrobených metodou Direct Metal Laser Sintering je pevnost a rozměrová přesnost, a proto jsou ihned využívány jako funkční díly. Naopak velkou nevýhodou je vysoká energetická a prostorová náročnost. Tato metoda je využívána na výrobu komplexnějších dílů, které se dříve vyráběly z více dílů [16, 18].

Na obrázku 12 je znázorněn vyrobený díl pomocí technologie DMLS.



Obrázek 12: Tvarově složitý díl vyrobený metodou DMLS [22]

Electron Beam Melting - EBM

Tato metoda je založena na tavení kovového prášku pomocí elektronového paprsku. Rozdíl mezi metodou EBM a DMLS je ve zdroji záření. Tavení elektronovým paprskem je podobné laserovému sintrování. Z důvodu zajištění řádného fungování tohoto elektronového paprsku probíhá veškerá výroba ve vakuu. Výhodou vakua je, že zabraňuje oxidaci kovového prášku při zahřívání. Některé typy tiskáren dokáží i vyrobený díl tepelně upravit (vytvdřit). Vyrobený díl je následně nutné povrchově upravit, pokud již nebyl vytvrzen pomocí 3D tiskárny. Metoda EBM umožňuje vyrábět díly, které dříve nebylo vyrobit možné z důvodu tvarové složitosti, výroba a pořizovací hodnota je stále poměrně nákladná, nicméně tyto díly jsou používány v biomedicině, v leteckém nebo v automobilovém průmyslu [23].

Na obrázku 13 je znázorněna 3D tiskárna značky Arcam EBM Spectra H.



Obrázek 13: Arcam EBM Spectra H [24]

5.3 Výroba z tuhých materiálů

V této skupině jsou používány všechny pevné materiály s výjimkou práškových materiálů. Stavební materiál je dodáván ve formě struny nebo ve formě listů k výrobě prototypových dílů [16, 18].

Laminated Object Manufacturing - LOM

Metoda Laminated Object Manufacturing je založena na výrobě dílu pomocí folií, které jsou lepeny na sebe pomocí speciálních lepidel. Folie jsou následně rozřezány pomocí laseru na požadovaný rozměr. Přebytný materiál je v poslední fázi odstraněn. Nejčastěji používané materiály pro výrobu jsou papír, plast nebo keramika [16, 18].

Před výrobou je nutné připravit STL model ve speciálním počítačovém softwaru. Díl je umístěn na plochu a následně rozřezán na 2D vrstvy [16, 18].

Před samotnou výrobou je připravena nosná deska, na kterou je připevněna první vrstva pomocí lepidla. Následně je ořezána s přesahem pomocí laseru. Poté je na nosnou desku umístěn rám, který zamezuje kroucení jednotlivých vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou válcovány pomocí válce zahřátého na teplotu 330°C, aby bylo aktivováno lepidlo. Tato operace je opakována, dokud není vyráběný díl dokončen. Hotový díl je sundán ze základní desky pomocí drátu, a poté sundání dílu je připraven na dokončovací operace [16, 18].

Vyrobená součást je nejčastěji používána za účelem vizualizace nebo prezentace nových výrobků [16, 18].

Fused Deposition Modeling - FDM

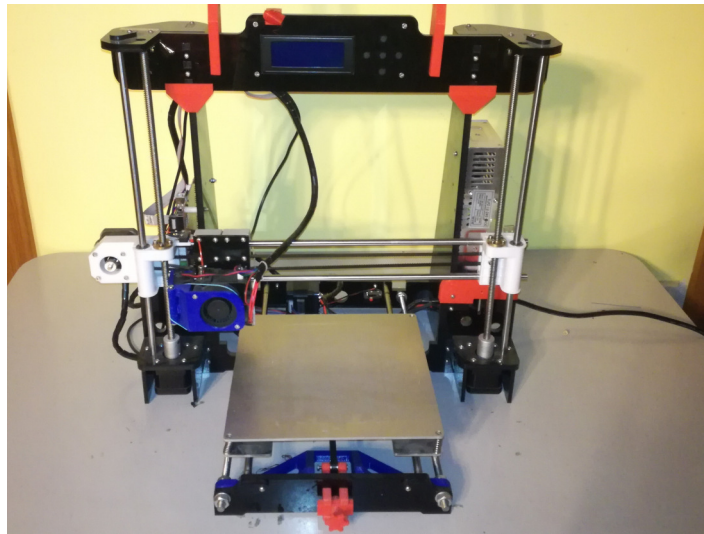
FDM je nejdostupnější a zároveň nejčastěji používaná metoda. Princip této metody je založen na natavování filamentu (polymerová struna navinutá na cívce) v zahřáté trysce. Tato hmota je nanášena na základní desku po vrstvách. Pro výrobu jsou používány různé materiály. Jedná se o akrylonitrilbutadienstyren (ABS), bioplast (PLA), polyethylentereftalát (PETG), polykarbonát, elastomer nebo vosk. V některých případech výroby dílu je nutné využití podpor. Podpory mohou být vytisknuty z rozpustných materiálů. Tato metoda je nenáročná na obsluhu a materiály, z nichž jsou díly vyráběny, jsou netoxické [9, 16, 18].

Před výrobou je nutné připravit program z STL modelu. Tento model je ve speciálním počítačovém programu rozřezán na 2D vrstvy. V tomto programu jsou také nastaveny parametry tisku, jako jsou například tloušťka vrstvy, rychlost tisku, způsob vyplňování nebo použití podpurného materiálu.

Před tiskem je nutné připravit základní podložku, která musí být vyhřátá na příslušnou teplotu, a to je nutné udělat i s tryskou. Poté je do trysky zavedena struna pomocí kladkového mechanismu poháněného krokovými motory. Některé FDM 3D tiskárny umožňují tisk z více materiálů na ráz. U nich je příprava pro tisk složitější. Poté, co je tryska i podložka dostatečně zahřátá, je započat tisk natavením struny a nanášením jednotlivých vrstev na podložku. Materiál je ochlazován přívodem vzduchu pomocí ventilátorů. Po dokončení tisku je nutné odstranit podpurný materiál. Vyrobený díl je možné následně obrábět a provést dokončovací operace. [2, 9, 16, 18]

Díly vyrobené touto metodou jsou používány pro vizualizaci, kontrolu rozměrů nebo funkčnost. V některých případech je vyrobený díl používán jako funkční [9, 16, 18].

Na obrázku 14 je znázorněna 3D tiskárna značky Anet A8.



Obrázek 14: ANET A8

Multi Jet Modeling - MJM

Tato metoda je také označována jako Multi Jet Printing (MJP) nebo Poly Jet Modeling (PJM). Technologie MJM je založena na nanášení vrstev termopolymeru na základní podložku. Pro nanášení je používána speciální hlavice, která má stovky trysek a pro vytvrzování je používáno UV světlo. MJM splňuje všechny požadavky, které jsou kladeny na výrobu funkčních součástí [9, 16, 18].

Před tiskem je nutné připravit program z STL modelu. Tento model je ve speciálním počítačovém programu, kde jsou nastaveny parametry tisku a následně je rozřezán na 2D vrstvy [9, 16, 18].

Tisk je prováděn pomocí speciální hlavice, která natavuje materiál. Při výrobě jsou všechny trysky v hlavici aktivní pro zefektivnění výroby. Materiály, které jsou používány pro výrobu, jsou termoplasty, vosk nebo materiály na bázi vosku. Materiál je nanášen na pracovní stůl pomocí jednotlivých vrstev. Podpory jsou tvořeny z vosku pro jednodušší odstraňování pomocí tepelného zdroje [9, 16, 18].

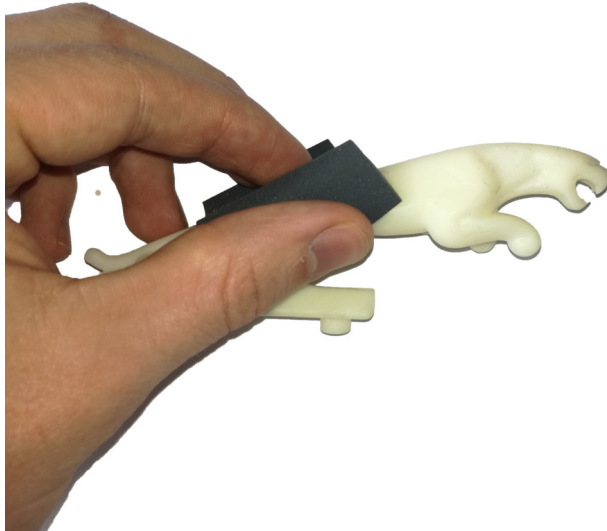
5.4 Dokončovací operace a úprava povrchu prototypu

Úprava povrchu je nezbytnou součástí výrobního procesu prototypové výroby. Cílem je vytvořit hladký povrch výrobku dle požadavků. Mezi nejčastěji používané metody úpravy povrchu patří broušení, leptání, tmelení, nástríik plničem a pískování [9, 16].

Broušení

Tato metoda je nejpoužívanější dokončovací metodou. Broušení je charakterizováno jako typ obrábění mnohobřítým nástrojem s nedefinovanou geometrií. Tento nástroj je tvořený ze zrn brusného materiálu, který je spojen pojivem. Broušení je typické svojí jednoduchostí. Nejčastěji používaný nástroj na broušení výtisků je brusný papír. Při broušení je povrch dílu zahříván, a proto je nutné, aby byl povrch broušen za přítupu chladiva (vody). Nevýhodou je, že dochází k nerovnoměrnému odebrání materiálu [19, 25].

Na obrázku 15 je znázorněno broušení sošky pomocí brusného papíru.

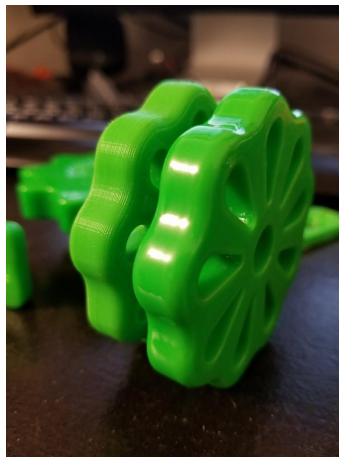


Obrázek 15: Broušení sošky pomocí brusného papíru

Leptání

Nejčastěji leptaným materiálem je akrylonitril-butadien-styren (ABS). Tento materiál je leptán pomocí Acetonu, protože s ním dobře reaguje. Metoda se jinak nazývá jako vyhlazování 3D modelů pomocí acetonových par. Cílem je odstranit texturu z povrchu výtisku. Model je vložen do parní komory s roztokem Acetonu. Poté je komora temperována na teplotu přibližně 80 °C. Tím je vytvořena acetonová pára, která rovnoměrně naleptává povrch modelu. Délka leptání je určena podle velikosti parní komory a velikosti výtisku. Po dokončení leptání je nutné nechat model v dobře odvětrávaném prostoru z důvodu změkklého vnějšího povrchu dílu, dokud povrch neztvrdne [19, 25].

Na obrázku 16 je znázorněna ukázka tištěného dílu z ABS materiálu před a po leptání pomocí Acetonu.



Obrázek 16: Ukázka tištěného dílu z ABS materiálu před a po leptání pomocí Acetonu

Tmelení

Tmelení neboli kitování je metoda, při které je na vnější povrch dílu nanesen tmel, který zakryje texturu po tisku. Před nanesením tmelu je lepší, když je povrch zbroušen, aby nemusela být nanesena, tak velká vrstva, a byly zachovány, co nejvíce rozměrové vlastnosti. Vrstva tmelu nemusí být nanesena rovnoměrně pomocí speciální stěrky, protože je nutné vrstvu tmelu následně zbrousit pomocí jemnozrnných brusných papírů, aby byl povrch dokonale hladký a bez vad. Tento proces opakujeme, dokud není povrch dokonale hladký. Tmelení musí být prováděno v dobře odvětrávané místnosti, kvůli toxickým vlastnostem chemikálie [19, 25].

Lakování

Lakování je jeden z posledních kroků dokončovacích operací a je založeno na nanášení jednotlivých vrstev laku pomocí lakovací pistole poháněné kompresorem. Lak je nanášen nejčastěji na povrch, který byl již zjemněn broušením nebo také upraven tmelením. Lakování je opakováno, dokud není dosažen požadovaný povrch [19, 25].

Na obrázku 17 jsou znázorněny nalakované sošky značky Jaguar.



Obrázek 17: Nalakované sošky značky Jaguar

Pískování

Pískování je založeno na upravování povrchu výtisku pomocí vysokotlakého otryskávání pomocí jemných zrn sedimentu nebo malých perliček. Tento způsob úpravy povrchu založený na ubírání materiálu po malých částicích povrch zjemní. Po dokončení je vytvořen celistvý a matný povrch. Otryskávání je používáno na geometricky složité výrobky, protože výrobek je opracován i v hůře přístupných plochách. Prováděno je v uzavřených komorách pomocí vysokotlaké pistole a postup trvá přibližně 5 až 10 minut než je povrch dokonale hladký [25].

6 Soft tooling

Lití do silikonových forem je často používáno, aby se uspořil čas výroby prototypů. Soft tooling je často používán na malosériovou výrobu či kusovou výrobu. Výhodou odlévání je kvalita vyráběného dílu, který je převážně vyráběn z vosku nebo z pryskyřice [9, 26, 27, 28, 29, 30].

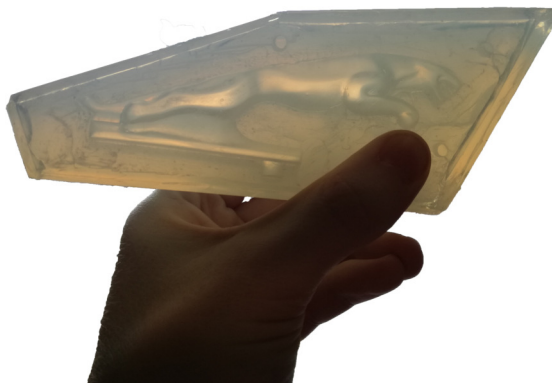
Forma na odlitky skládající se z 2 dílů je vyráběna za pomoci reálného 3D Master modelu, který byl vyroben jednou z metod rapid prototyping a slouží jako jádro pro formy. Silikon je vléván do předpřipravené formy, do které je také vložen Master

model. Tento proces probíhá ve vakuové komoře, aby bylo zamezeno defektům, ale to nemusí být podmínkou. [9, 26, 27, 28, 29, 30].

Odlévání probíhá za atmosferického plaku nebo ve vakuové komoře. Po odlití a zhotovení odlitku je nutná jeho povrchová úprava. Přebytečný materiál, který vznikl při odlévání, je nutné odstranit [9, 26, 27, 28, 29, 30].

Velkou předností je možnost odlévání tvarově složitých tenkostěnných dílů s negativními úkosy. Metoda je obdobně přesná jako vstřikování plastů [9, 26, 27, 28, 29, 30].

Na obrázku 18 je znázorněna silikonová forma na odlíky.



Obrázek 18: Silikonová forma na odlíky

Praktická část

7 Základní charakteristika součásti

Zkoumanou součástí je soška značky Jaguar. Soška byla vypůjčena z originálního vozu značky Jaguar XJ6 z roku 1985. Z důvodu bezpečnostních opatření firmy Jaguar byly sošky staženy z výroby a již je nevyskytuje na trhu. Z tohoto důvodu je díl ideální pro uplatnění v procesu reversního inženýrství, rapid prototyping a pro aplikaci povrchových úprav. Díl je znázorněn na obrázku.

Na obrázku 19 je znázorněna originální soška.



Obrázek 19: Originální soška Jaguar

8 3D skenování pomocí softwaru GOM skeneru

Z důvodu tvarové složitosti dílu byla zvolena technologie bezkontaktního 3D skenování pomocí optického skeneru GOM Atos Compact 2. Před skenováním bylo nutné díl zmatnit, protože soška je poniklována, a to zamezuje správnému naskenování. Lesklý povrch je možné naskenovat, ale je to velice obtížný proces. Je nutné upravovat jas při každém snímání. Optický mechanismus skeneru dokáže zpracovat a nasnímat lesklé a černé povrchy, ale s problémy, a proto byl pro zmatnění vnějšího povrchu zvolen titanový prášek smísený s alkoholem, jenž byl na tělo sošky nanesen pomocí Airbrush pistole s průměrem trysky 0,3 mm poháněné kompresorem. Směs titanového prášku a alkoholu byla rozprašována na zkoumaný díl. Pro nanesení rovnoměrné titanové vrstvy byl zvolen tlak 0,6 barů, který byl následně regulován pomocí ventilu na lakovací pistoli. Směs byla nanášena ze vzdálenosti přibližně 0,5 metrů.

Na obrázku 20 je znázorněno nanášení titanového prášku na povrch sošky pomocí technologie Airbrush.

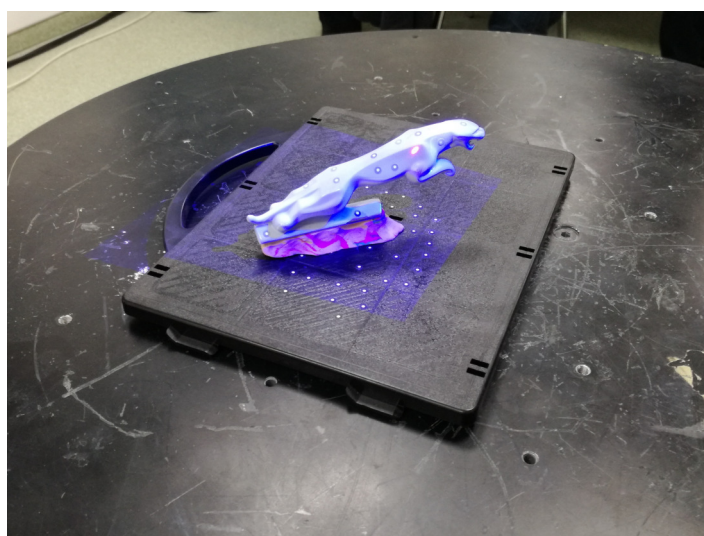
8. 3D SKENOVÁNÍ POMOCÍ SOFTWARE GOM SKENERU



Obrázek 20: Nanášení titanového prášku na povrch sošky pomocí technologie Airbrush

Po zaschnutí směsi bylo nutné očistit místa pro nanesení referenčních (orientačních) bodů pomocí vatových tyčinek. Referenční body byly nalepovány na očištěná místa. Tento postup umísťování referenčních bodů je opačným postupem. Tento nezvyklý postup byl zvolen z důvodů dobré přilnavosti titanového prášku na orientačních bodech, a tím byly body znehodnoceny a skener je nebyl schopen rozlišit od povrchu sošky. Z důvodu tvarové složitosti a malých rozměrů sošky byly zvoleny body o malém průměru. Kvůli četnosti rádiusů na dílu byla vybrána místa pro aplikaci s co nejprůmějším povrchem například hřbet, ocas, lopatky, hrudník, břišní část a podstavec. Pokud by byly body nalepovány do záhybů, tak by byla následná úprava sítě velice obtížná. Na základě malého množství nalepených bodů na sošce byly umístěny body i na skenovací podložku. Tyto body slouží ke správnému skládání snímků. Po tomto úkonu bylo důležité znovu nanést titanový prášek na místa, odkud byl odstraněn nechtěným setřením. Následně byl díl připevněn k podložce pomocí modelovací hmoty.

Na obrázku 21 je znázorněna soška s slepenými referenčními body připravená ke skenování.



Obrázek 21: Soška připravená ke skenování

8. 3D SKENOVÁNÍ POMOCÍ SOFTWARE GOM SKENERU

Poté, co byl díl připevněn ke skenovací podložce, bylo nezbytné připravit 3D skener. Pro skenování byla využita a následně nainstalována čočka v malém objemu, která je vhodná pro zkoumání malých objektů k detailnímu skenování.

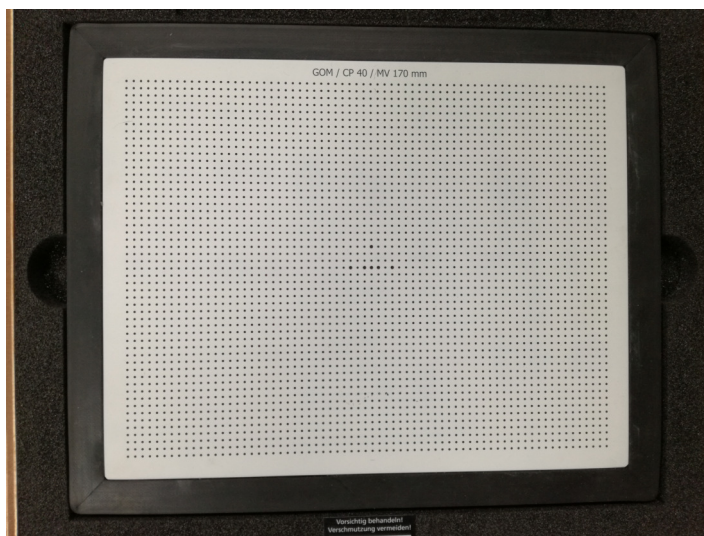
Na obrázku 22 je znázorněn čočka pro snímání malých objemů.



Obrázek 22: Čočka pro snímání malých objemů

V dalším kroku bylo nutné nechat skener zahřát přibližně podobu dvaceti minut. Po zahřátí skeneru byla provedena kalibrace pomocí přípravku na kalibraci a svinovacího metru pro určení vzdálenosti čočky od přípravku. Po dokončení kalibrace bylo již vše připraveno ke skenování.

Na obrázku 23 je znázorněn přípravek na kalibraci skeneru.



Obrázek 23: Přípravek na kalibraci skeneru

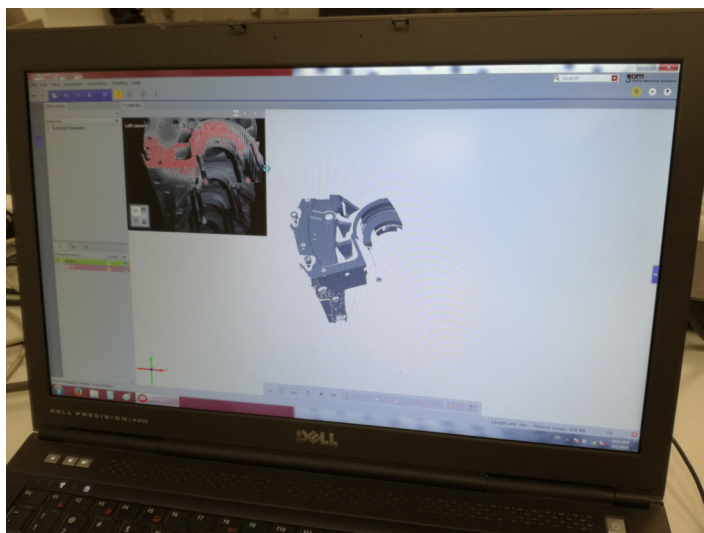
Soška byla umístěna a vycentrována na automatický otočný stůl. Snímaný objekt byl digitalizován pomocí programu Atos professional. Nejprve bylo odzkoušeno, jestli počítačový program GOM inspect všechny referenční body rozlišuje od okolního prostředí.

Pro skenování, co největšího objemu najednou, bylo použito automatické 360° skenování pomocí deseti snímků. Automatické snímání bylo opakováno z několika různých úhlů. Tímto postupem byl zachycen hrubý objem. Následně bylo použito manuální snímání, protože soška nebyla kompletně nasnímaná pomocí automatiky. Díky laseru na skeneru byly čočky nasměřovány na požadované místo ke snímání. Poté byla zvolená část nasnímaná. Tímto způsobem byla zaznamenána celá soška. Z důvodu malých rozměrů

sošky bylo nezbytné díl otočit o 180° kolem osy y, aby byla naskenována i spodní část sošky.

Všechny snímky byly převedeny do digitální podoby pomocí počítačového programu Atos professional. Zde byly všechny snímky složeny dohromady a zkompletovány v mrak bodů do tvaru snímané součásti. Následně byly odstraněny přebytečné body, které byly nasnímány z pracovní podložky. Tyto body byly nežádoucí. Následně byly tyto body spojeny a vytvořily mrak bodů, který obsahoval díry z průběhu skenování a neměl ustálený souřadnicový systém. Těleso bylo následně uloženo.

Na obrázku 24 je znázorněno skenování pomocí počítačového programu Atos professional .



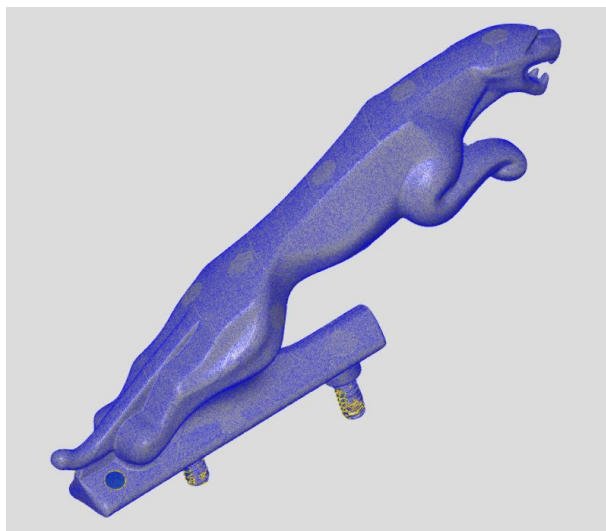
Obrázek 24: Počítačový program Atos professional

9 Převod skenu do 3D modelu

9.1 Úprava skenu v GOM Inspect 2018

Zkoumaný díl musel být upraven v počítačovém programu GOM Inspect, protože obsahoval mnoho děr v síti bodů a neměl ustálený souřadný systém.

Na obrázku 25 je znázorněna původní síť bodů v programu GOM Inspect 2018.



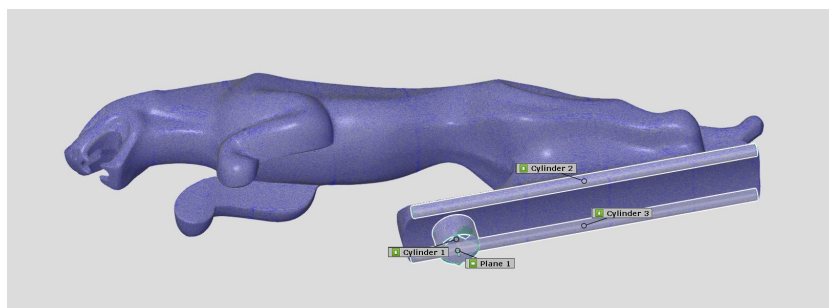
Obrázek 25: Původní síť v programu GOM Inspect 2018

Pomocí tohoto programu byly všechny díry odstraněny a síť bodů byla spojena. Díry byly uzavírány pomocí podobnosti sousedních bodů. Následně bylo nutné celou síť bodů důkladně prohlédnout, jestli neobsahuje povrchové nedokonalosti. Některá místa v síti bylo nezbytné vyříznout a nahradit novou vygenerovanou sítí. Byla to místa s oděrkami z provozu. To mělo za příčinu nedokonalé tvarové rozměry. Některé referenční body byly znečištěny titanovým práškem, a proto nebyly rozpoznány 3D skenerem, a vytvořily na těle zkoumané součásti nedokonalosti a defekty. Tyto body byly pomocí programu GOM Inspect odstraněny a zrekonstruovány pomocí automatického uzavírání děr. Tento úkon byl proveden i u zbylých defektů a nedosnímaných částí, které byly na těle.

V dalším kroku bylo důležité odstranit naskenovaná těla šroubů, která sloužila k uchycení k podložce při skenování. Po odstranění těchto nežádoucích prvků byla místa po šroubech uzavřena pomocí automatického uzavření sítě a byly odstraněny defekty z tlamy sošky. Také byly opraveny nerovnosti povrchu, které obsahoval původní skenovaný díl po předchozím používání. Jednalo se o to místa na hranách dílu a na rádiusech sošky. Nerovnosti byly upraveny zjemněním mřížky. Když byla celá síť bodů kompaktní a opravena, byla celá síť zredukována z důvodu velikosti souboru.

Souřadný systém byl ustálen a do sítě byly zkonstruovány pomocné válce, roviny a osy.

Na obrázku 26 je znázorněna geometrie pro ustavení souřadného systému v programu GOM Inspect 2018.



Obrázek 26: Geometrie pro ustavení souřadného systému v programu GOM Inspect 2018

Ve formátu STL byl vygenerován díl, který byl následně upravován v počítačovém programu Catia.

Na obrázku 27 je znázorněn STL model z programu GOM Inspect 2018.

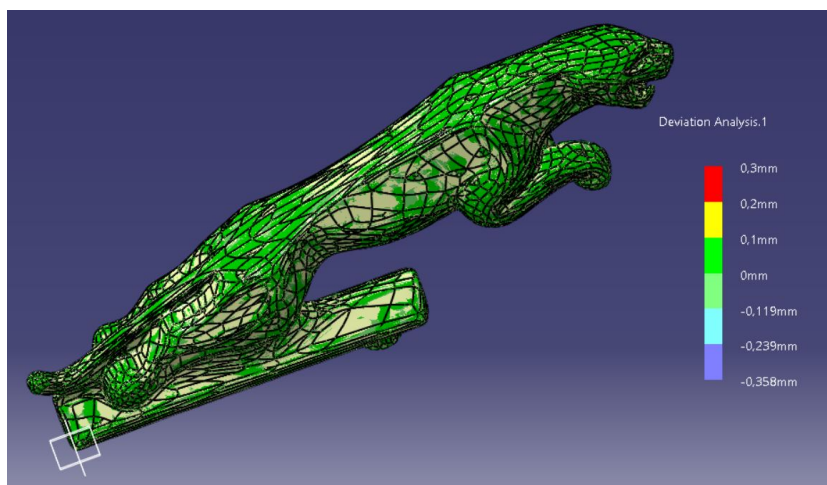


Obrázek 27: STL model z programu GOM Inspect 2018

9.2 Úprava 3D modelu v softwaru CATIA

Vygenerovaný díl ve formátu STL byl dále upravován v počítačovém programu Catia. Nejprve byl vygenerován automatický povrch, který měl nastavenou hlavní odchylku povrchu 0,02 mm. Dále byly nastaveny detaily povrchu na hodnotu 500 a cílový poměr měl hodnotu 90. Po provedení odchylkové analýzy byly upravovány rozměry určitých míst, kde byla odchylka větší než 0,4 mm od původního modelu. Tato místa byla ručně domodelována v uvedeném počítačovém programu. Četný výskyt odchylek se nacházel na podstavci zkoumané sošky. Po provedení rozměrové analýzy se ukázalo, že největší odchylka od původního rozměru měla hodnotu 0,2 mm. Pomocí příkazu close surface byla celá plocha uzavřena v celistvý povrch. Na závěr byl vygenerován díl ve formátu stl. Tímto úkonem byl vytvořen finální Master model, který byl použit pro replikovou výrobu.

Na obrázku 28 je znázorněna rozměrová analýza z programu CATIA.



Obrázek 28: Rozměrová analýza z programu CATIA

10 Rapid prototyping

Pro výrobu vybraného Master modelu byl zvolen 3D tisk technologií DLP a FDM. Tyto dvě metody byly zvoleny z důvodu porovnání drsnosti povrchu vytištěného dílu a následného zvolení pro pokračující výrobu.

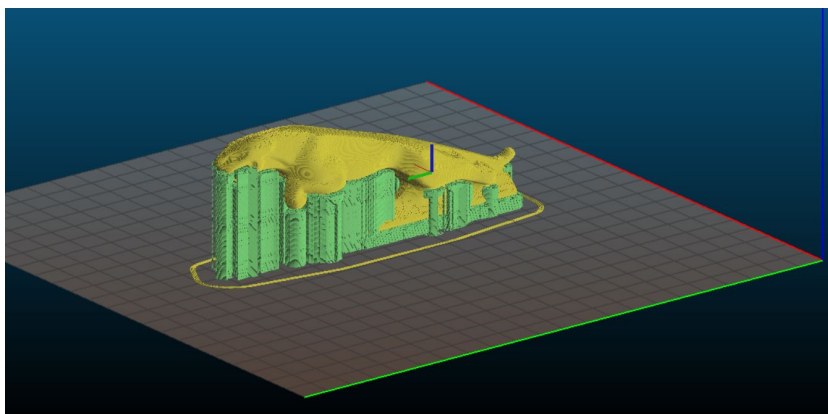
10.1 Výroba Master modelu pomocí FDM technologie

FDM technologie 3D tisku byla vybrána z důvodu cenové dostupnosti výrobního materiálu, cenové dostupnost FDM tiskáren a rozšířenosti této technologie. Pro výrobu byla zvolena jedna z nejlevnějších tiskáren na trhu od firmy Anet 3D printer typ Anet A8, protože tuto tiskárnu vlastním.

Pro výrobu dílu byl zvolen materiál červený PLA Gembird 1,75 mm. Vytvořený stl model z předchozí operace byl dále upravován v programu Slic3r. V tomto programu byl do modelu přidán podpurný materiál, aby bylo možné vyrobit díl. Následně bylo provedeno základní nastavení tisku. Nejprve byly nastaveny teploty na podložce a extruderu. Na první vrstvu tisku byla nastavena teplota 220 °C a všechny ostatní vrstvy byla nastavena teplota 215 °C na extruderu a na Hot bedu (tisková vyhřívaná podložka) byla nastavena konstantní teplota 60 °C pro celý průběh tisku. Z důvodu z voleného výrobního materiálu PLA bylo důležité zapnout okamžité chlazení vytištěných vrstev, aby bylo dosaženo lepší struktury povrchu. Tryska použitá pro tisk měla průměr 0,4 mm. Tloušťka jedné vrstvy byla 0,2 mm. Pro úsporu materiálu byl použit 15 procentní trojúhelníkový infill (výplň). Následně byl připraven supportní (podpurný) materiál ve tvaru pilířů, který byl vygenerován automatikou. Odskok vrstvy, která přiléhá k dílu byl nastaven 0,2 mm. Rychlosti byly nastaveny od 25 mm s⁻¹ do 100 mm s⁻¹.

Po provedení základního nastavení byl do počítačového programu vložen STL model zvolené součásti a zkontrolovány jednotlivé vrstvy tisku pomocí funkce preview (náhledu). Po tomto úkonu byl vygenerován program pro tisk ve formátu gcode.

Na obrázku 29 je znázorněna příprava Gcodu z programu Slic3r.

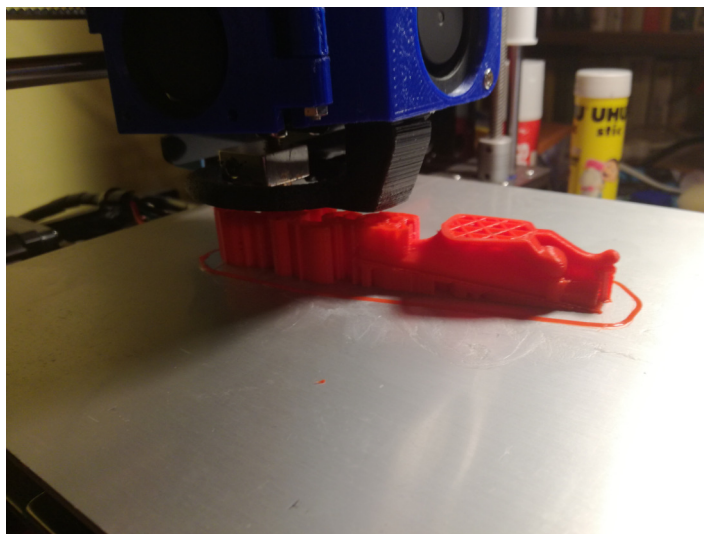


Obrázek 29: Příprava Gcodu z programu Slic3r

Vygenerovaný gcode byl vložen na paměťovou kartu, která byla vložena do 3D tiskárny. Před započítím tisku byla tiskárna předehřátá na požadovanou teplotu z důvodu zavedení filamentu (plastové struny). Poté byl připraven Hot Bed (vyhřívaná podložka). Na podložku byla umístěna skleněná deska, na kterou byla nanesena tenká vrstva lepidla

a roztoku ABS juice (roztok Acetonu a materiálu ABS) pro lepší přichycení první vrstvy. Podložka byla vycentrována a po provedení těchto úkonů byl spuštěn tisk.

Na obrázku 30 je znázorněn průběh tisku FDM technologií.



Obrázek 30: Průběh tisku FDM technologií

Hotový vytisknutý díl byl ponechán na podložce, aby rovnoměrně vychladl. Po dokončení této operace byl díl sundán z podložky a očištěn od podpor. V tuto chvíli byl díl připravený na post processing (povrchové úprava).

Při výrobě touto metodou bylo nutné použít tyto pomůcky: špachtle, kleště, šroubovák a štětec.

Na obrázku 31 je znázorněn vytištěný model FDM technologií.



Obrázek 31: Vytištěný model FDM technologií

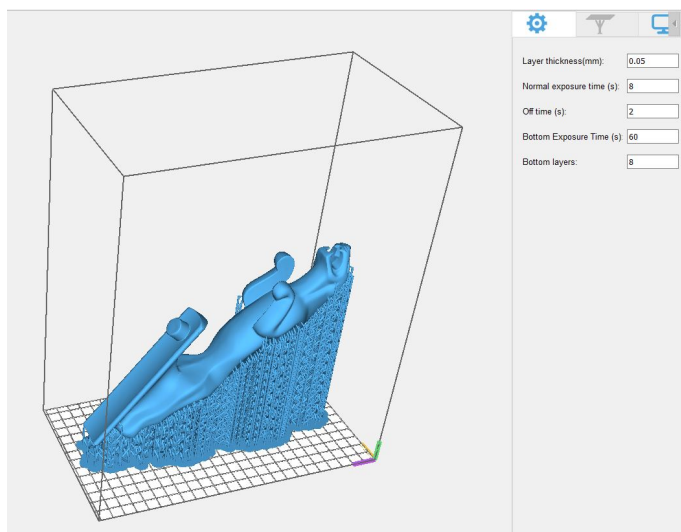
10.2 Výroba Master modelu pomocí DLP technologie

DLP technologie 3D tisku byla použita z důvodu větší kvality tisku a možnosti vytištění větších detailů oproti FDM technologii. Pro výrobu byla použita 3D tiskárna Anycubic Photon, kterou vlastním a jako materiál byl použit bílý ANYCUBIC Multi Color 405nm UV Sensitive Resin (UV resistivní materiál).

Nejprve bylo důležité připravit model pro výrobu v počítačovém programu ANYCUBIC Photon Slicer V1.3.6. CAD model byl umístěn do počítačového programu na virtuální podložku. Díl bylo nezbytné pootočit kolem osy x o 130° , aby bylo možné díl vyrobit. V programu byla nastavena výška vrstvy na 0,05 mm. Doba vystavení materiálu UV světlem byla nastavena na 60 sekund pro prvních 8 vrstev tisku a 8 sekund pro zbylé vrstvy. Doba pro ustálení hladiny mezi vysvěcováním jednotlivých vrstev byla nastavena na 2 sekundy. Poté byly v programu vygenerovány automatické podpory velikosti light

(lehké). Následně byl vygenerován (vyslicerován) program s příponou *.photon. Tento soubor byl uložen na flash disk, který byl vložen do tiskárny Anycubic Photon.

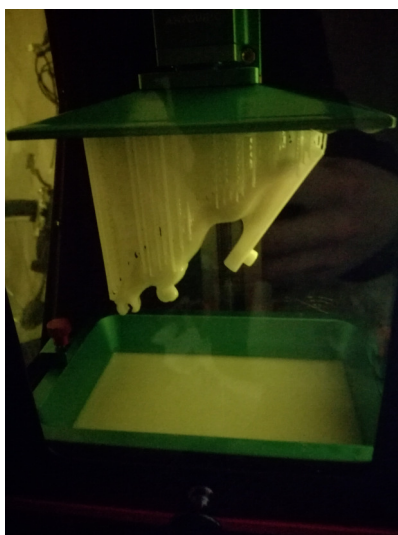
Na obrázku 32 je znázorněna příprava programu pro 3D tisk technologií DLP.



Obrázek 32: Příprava programu pro 3D tisk technologií DLP

Před tiskem byla tiskárna připravena na tisk. Tisková plocha byla vycentrována, očištěna isopropylalkoholem a nastavena nulová hodnota z osy. Do tiskárny byla vložena vana, zajištěna jistíci šrouby, která slouží jako zásobník resistivní kapaliny. Do vany byl nalitý UV resin po rysku maxima. Do tiskárny byl vložen flash disk a spuštěn tisk. Tisk na tiskárnách DLP a SLA musí probíhat bez přístupu světla, aby nebyl tisknutý díl znehodnocen.

Na obrázku 33 je znázorněn průběh 3D tisku technologií DLP.

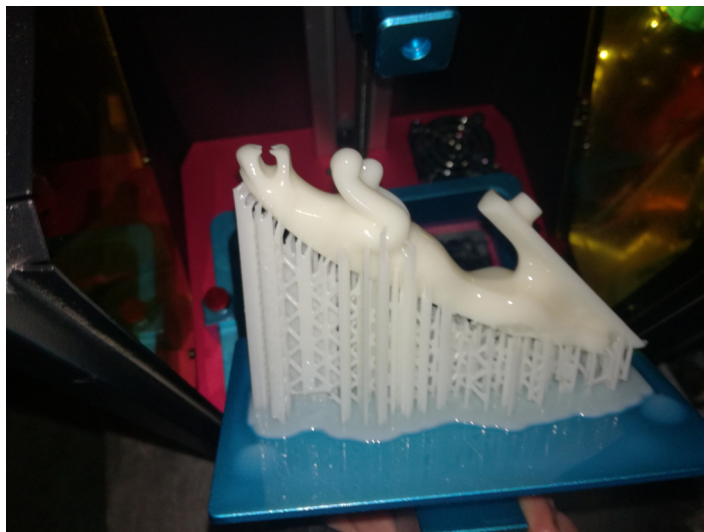


Obrázek 33: Průběh 3D tisku technologií DLP

Po dokončení tisku byl díl sundán z tiskové podložky pomocí špachtle. Následně byla připravena lázeň pro očištění dílu od přebytečného nevytvrzeného resinu. Toto čištění probíhalo ve dvou lázních. V jedné byl isopropylalkohol a ve druhé H₂O (čistá voda). Díl se namáčel střídavě v jedné a druhé lázni a pomocí štětečku byl čištěn, dokud nebyla soška

dokonale čistá. V dalším kroku byl díl vložen pod UV lampu, protože musela být soška dodatečně vytvrzena před dalšími povrchovými úpravami. Po vytvrzování byly odstraněny podpory postupným odlamováním. V tuto chvíli byl díl připravený na post processing (povrchové úprava).

Na obrázku 34 je znázorněna dotištěná soška na tiskové podložce.



Obrázek 34: Dotištěná soška na tiskové podložce

Při výrobě touto metodou bylo nutné použít ochranné pomůcky z důvodu chemického složení UV resin. Při výrobě byly použity gumové rukavice, rouška proti vdechování chemikálií, štětečky pro čištění, filtry a kleště. Také bylo použito UV světlo a nádoby pro vytvoření lázní pro čištění.

10.3 Post processing a příprava jádra pro formu na odlitek

Vytištěné prototypy pomocí technologie DLP a FDM bylo nezbytné povrchově upravit, aby byly odstraněny všechny povrchové nedokonalosti, které vznikly tištěním nebo odstraňováním podpor. Broušení těchto dílů bylo prováděno pod vodou pomocí brusných papírů se zrnitostí 400 a 1000, které byly z karbidu křemíku. Po dokončení broušení byly díly vizuálně zkontrolovány, a proto byl vybrán díl vyrobený pomocí technologie DLP. Detaily na této sošce byly nesrovnatelně lepší než na sošce vyrobené pomocí FDM technologie.

Na obrázku 35 je znázorněna vytištěná soška DLP technologií před broušením a na obrázku 36 znázorněna vytištěná soška FDM technologií před broušením.



Obrázek 35: Povrch sošky vytištěné DLP technologií



Obrázek 36: Povrch sošky vytištěné FDM technologií

10.4 Výroba zvoleného dílu pomocí soft tooling

Pro malosériovou výrobu byla zvolena metoda odlévání do pryskyřicových forem, u kterých je jako jádro zvolen model vytištěný pomocí DLP tiskárny. Jedna forma má předepsanou životnost 20 odlití než dojde k znehodnocení. Odlévání do pryskyřicových forem není ekonomicky ani časově náročný proces na výrobu požadované součásti.

Na obrázku 37 je znázorněn Master model vytištěný DLP technologií.



Obrázek 37: Vytištěný Master model DLP technologií

Výroba formy

Pomocí modelovací hmoty byla vytvořena dělicí rovina. Do modelovací hmoty byla zamodelována přibližně polovina dílu. Dělicí rovina vedla přibližně středovou osou modelu a následně podél tlapky Jaguára pro lepší rozdělování dvoudílné formy. Ze skleněných

desek byl vytvořen skelet formy, jenž byl utěsněn pomocí tavící silikonové pistole. Její velikost byla dána velikostí dílu.

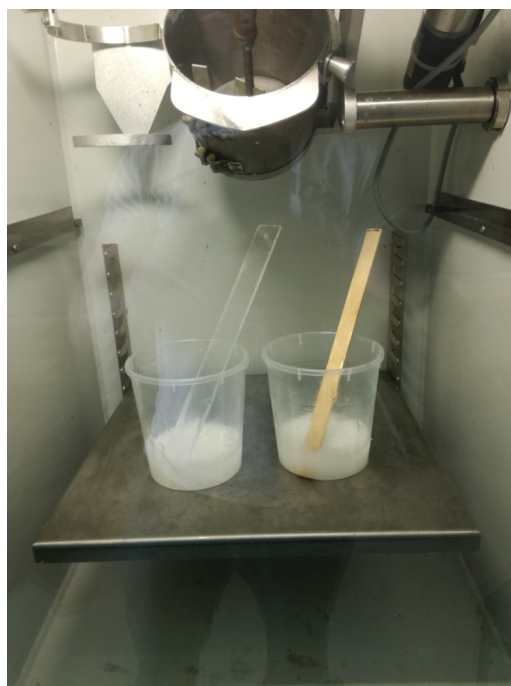
Na obrázku 38 je znázorněna výroba silikonové formy.



Obrázek 38: Výroba silikonové formy

Na vytvoření formy byl namíchán silikon smícháním dvou složek látky v předepsaném poměru 1:10. Tyto dvě složky byly Silikon RTV-4234-T4 Base a Vernetzer Silastic T-4 O. Po dokonalém promísení byla směs vložena do vakuové komory. V komoře byl odsát vzduch skoro na absolutní vakuum. Tímto úkonem byly aktivovány všechny látky pro vytvoření silikonu. Okamžitě po vyndání tekutého silikonu z vakuové komory byl opatrným naléváním do skleněného skeletu formy naléván, aby ve formě nevznikly bublinky (nedokonalosti v odlitku). Vše se nechalo zatuhnout přibližně po dobu 24 hodin.

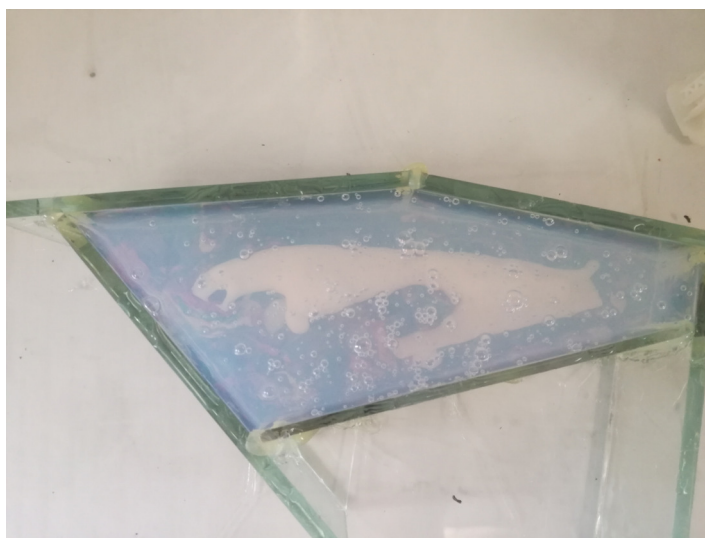
Na obrázku 39 je znázorněn tekutý silikon ve vakuové komoře MK-mini.



Obrázek 39: Tekutý silikon ve vakuové komoře MK-mini

Po zatuhnutí celého objemu byly odstraněny všechny skleněné desky, byla odstraněna modelovací hmota, která tvořila dělicí rovinu, a celý díl formy byl očištěn pomocí štětečku a kompresorové pistole. Podél celého obvodu první části formy byl vytvořen znovu skelet a byl utěsněn pomocí silikonové tavné pistole. Do této části formy bylo zpět vloženo jádro. Stejným postupem byla vytvořena i druhá část silikonové formy. Když všechn silikon zatuhl, byly znovu odstraněny všechny skleněné destičky a celá forma byla očištěna od přebytečného silikonu. Pomocí skalpelu byly ořezány a zarovnány hrany formy. Dále byl vyříznut do formy otvor pro odvětrávání formy a pro lepší zatékavost pryskyřice při odlévání. Do formy byl vyříznutý také vtokový otvor v ocasní části sošky. Tímto úkonem byla dokončena výroba formy pro odlitky.

Na obrázku 40 je znázorněna výroba jedné poloviny silikonové formy.



Obrázek 40: Část silikonové formy

Odlévání

Obě části formy byly přiloženy k sobě a utěsněny pomocí lepící pásky. K otvoru formy byl přilepen trychtýř pomocí tavící pistole pro lepší nalévání pryskyřice. Pryskyřice použitá na odlitky se skládá ze dvou složek SG 2000 gelblich transparent Komponent A a Komponent B v poměru 1:1. Tyto dvě složky se odváží v požadovaném poměru, který je uvedený v příloženém letáku. K vážení byla použita digitální kuchyňská váha a lékařské injekční stříkačky. Navážené složky se důkladně promísí a v co nejkratším čase je nutné tekutou pryskyřici nanést do formy, protože obě složky spolu okamžitě reagují. Pro lepší zatečení materiálu byla forma umístěna do vakuové komory, aby byl v odlitku co nejmenší počet defektů. Tvrdnutí celého objemu trvá přibližně 20 minut. Po ztvrdnutí celé sošky byla forma rozdělena a model byl vyndán z formy.

Na obrázku 41 je znázorněno odlévání do silikonové formy.



Obrázek 41: Odlévání do silikonové formy

V prvním pokusu nebyl ve formě vyříznut odvětrávací kanálek, a proto materiál nezatekl do celého objemu dílu, a také byl špatně odměřen materiál a nevystačil do celého těla.

Při druhém odlévání bylo zjištěno, že ve formě byla vytvořena krátká vtoková soustava a to způsobilo odstranění části nevytvrdnutého materiálu z ocasní části.

Před třetím odléváním byl k formě přilepen trychtýř ke vtokovému otvoru. Čímž se prodloužil systém vtokové soustavy a vyřešil se tím problém s zatékavostí. Tento model byl připravený na další povrchové úpravy.

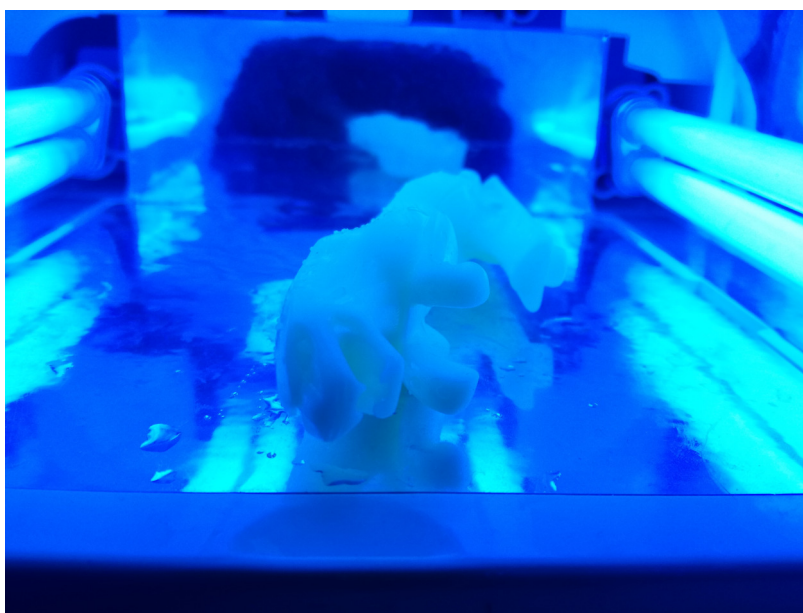
10.5 Post processing

Vyrobené sošky bylo nutné povrchově upravit, aby bylo dosaženo nej přesnější kopie. Po vytištění a odlití je na povrchu součástí mnoho nežádoucích defektů, které je nutné zredukovat nebo úplně odstranit.

Vytvrzování pomocí UV lampy

Sošky vytištěné z tekuté pryskyřice byly vytvrzeny pomocí UV lampy. Vytvrzování probíhalo přibližně 20 minut v uzavřeném prostoru. V průběhu vytvrzování bylo nutné model otáčet, aby byl vytvrzen celý povrch modelu. Po vytažení modelu z tiskárny byl povrch modelu změkklý, a proto je prováděna tato dokončovací operace.

Na obrázku 42 je znázorněno vytvrzování vytištěné sošky pomocí technologie DLP pod UV lampou.



Obrázek 42: Vytvrzování vytištěné sošky pomocí technologie DLP pod UV lampou

Broušení

Všechny vyrobené sošky bylo nutné zbrousit. K broušení se používaly zrnitosti 400 a 1000. Veškeré broušení bylo prováděno ručním broušením pod vodou, aby nedošlo ke spálení broušeného povrchu. Na vytištěné sošce bylo nutné odstranit body po podporách a také zbrousit místa, ve kterých se objevily defekty způsobené v průběhu tisku. S největší pravděpodobností byly způsobeny vibracemi přenesenými ze stolu, na kterém byla tiskárna umístěna. Všechna tato místa byla důkladně zbroušena.

Na obrázku 43 je znázorněno broušení vnějšího povrchu sošky.



Obrázek 43: Broušení vnějšího povrchu sošky

Tmelení

Tmel byl použit kvůli zaplnění všech nedokonalostí v povrchu a ke spojení povrchu po celém objemu tělesa. Ke tmelení byl použit automobilový tmel, který se používá ve firmě Škoda Auto Kvasiny. K nanesení a uhlazení tmelu byla použita elastická rukavice a prst, protože plochy na sošce jsou příliš malé. Po nanesení a ztvrdnutí tmelu byl povrch zbroušen a zarovnán. Tyto dva úkony se opakovaly, dokud nebyl povrch přijatelný.

Na obrázku 44 je znázorněno tmelení vnějšího povrchu sošky.



Obrázek 44: Tmelení vnějšího povrchu sošky

Lakování

Lakování probíhalo v automobilové lakovně profesionálním lakýrníkem. Pro lakování byly vybrány dva prototypy jeden vytištěn DLP metodou a druhý odlitý. Do sošky byly vyvrtány pomocné otvory pro uchycení při lakování. Pro lakování byla zvolena barva šedá titan metalíza W6W od firmy Škoda Auto. Soška byla nalakována pomocí profesionální lakovací pistole poháněné kompresorem. Díl byl nejprve nalakován podkladovou barvou, která byla následně lehce ručně zbroušena a na druhou vrstvu byla použita šedá titan metalíza. Po dokončení lakování byl díl vložen do pece, ve které byla nastavena teplota 60 °C. Tato pec sloužila pro vytvrzení laku, který byl na díl nanesen. Vytvrzování probíhalo 20 minut. Následně byly sošky vytaženy z pece, aby vychladly.

Na obrázku 45 je znázorněna nalakovaná soška.



Obrázek 45: Nalakovaná soška

Leštění

Po nalakování dílů byla metalíza leštěna. Na leštění byla použita sada pro leštění, ve které se nacházela mikroutěrka FESTOOL, vosková pasta na leštění laků TEMPO a leštící jehnětina. Nejprve byl díl důkladně očištěn od nečistot a částic prachu, které by mohly znehodnotit (poškrábat) lak. Na lak byla nanесena leštící pasta a rozleštěna po celém objemu pomocí mikroutěrky. Pasta byla důkladně rozetřena po celém objemu. Na doleštění nedostatků laku (tečení laku a zakrytí vrypů v laku) byla použita leštící jehnětina. Leštění probíhalo, dokud nebyl lak dostatečně rozleštěný, ale zároveň byla nutná opatrnost, aby nebyla barva narušena.

Na obrázku 46 je znázorněno leštění nalakované sošky.



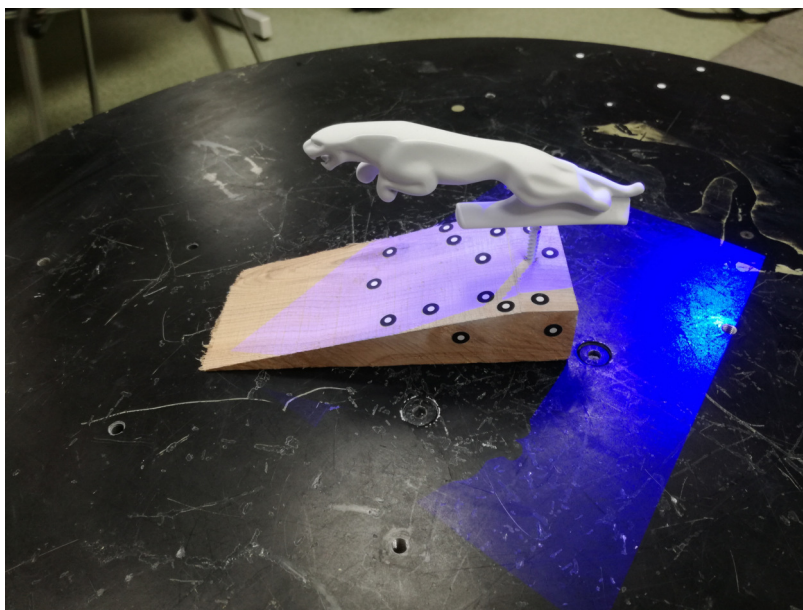
Obrázek 46: Leštění nalakované sošky

11 Rozměrová analýza dokončených sošek

11.1 3D skenování dokončených sošek

Rozměrová analýza dokončené sošky byla provedena v počítačovém programu GOM Inspect 2018, který porovnává rozměry dokončené sošky a CAD modelu. Pro získání sítě bodů dokončených sošek bylo použito optické zařízení GOM Atos Compact 2. Skenování finálních sošek probíhalo stejným způsobem jako skenování originální sošky. Jediným rozdílem při skenování byl použitý materiál pro zmatnění vnějšího povrchu. Titanový prášek byl nahrazen sádrou.

Na obrázku 47 je znázorněno 3D skenování dokončené sošky.



Obrázek 47: 3D skenování dokončené sošky

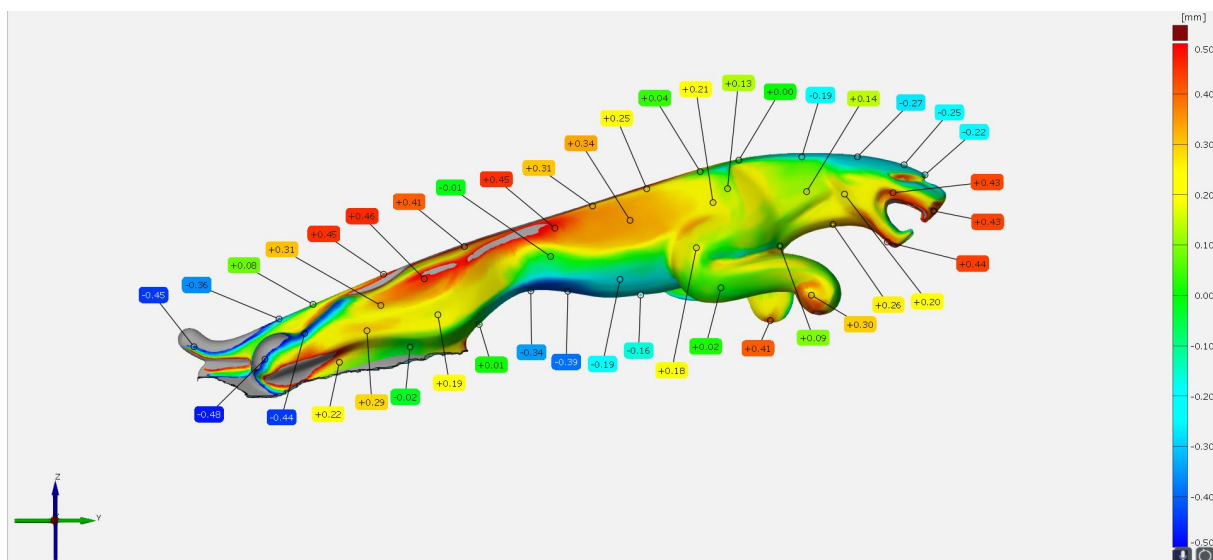
11.2 Proces vyhodnocení odchylek rozměrů v GOM Inspect 2018

Do počítačového programu GOM Inspect 2018 byly importovány naskenované sítě bodů odlité a vytištěné finální sošky a jejich následné nezávislé porovnání s CAD modelem, který byl do programu také importován. V dalším kroku byly odstraněny podstavce sošek, které byly nadbytečné pro rozměrovou analýzu. Pomocí příkazu prealignment byla síť bodů vytištěné sošky vůči CAD modelu vycentrována. Následně bylo provedeno porovnání těchto dvou prvků pomocí příkazu Surface Comparison On CAD. Maximální odchylka byla nastavena na $\pm 0,5$ mm. Odchylky byly barevně vizualizovány, kde červená barva značí maximální kladnou, zelená nulovou a modrá maximální zápornou odchylku. Místa šedivě zbarvená byla s odchylkou větší než $\pm 0,5$ mm. Pro upřesnění odchylek byly použity odkazové body s hodnotami v náležitém místě na povrchu sošky. Tento postup byl aplikován i na odlitou finální sošku.

11.3 Rozměrová analýza vytištěné finální sošky

Po dokončení rozměrové analýzy finální vytištěné sošky vůči CAD modelu bylo zjištěno, že největší odchylky se nacházely v oblasti spodních zad, tlamy, ocasu, břišní části a konce zadních noh. Tyto odchylky byly způsobeny chybou tisku, lakováním nebo tme-
lením.

Na obrázku 48 je znázorněny rozměrové odchylky povrchů tištěné sošky a CAD modelu.

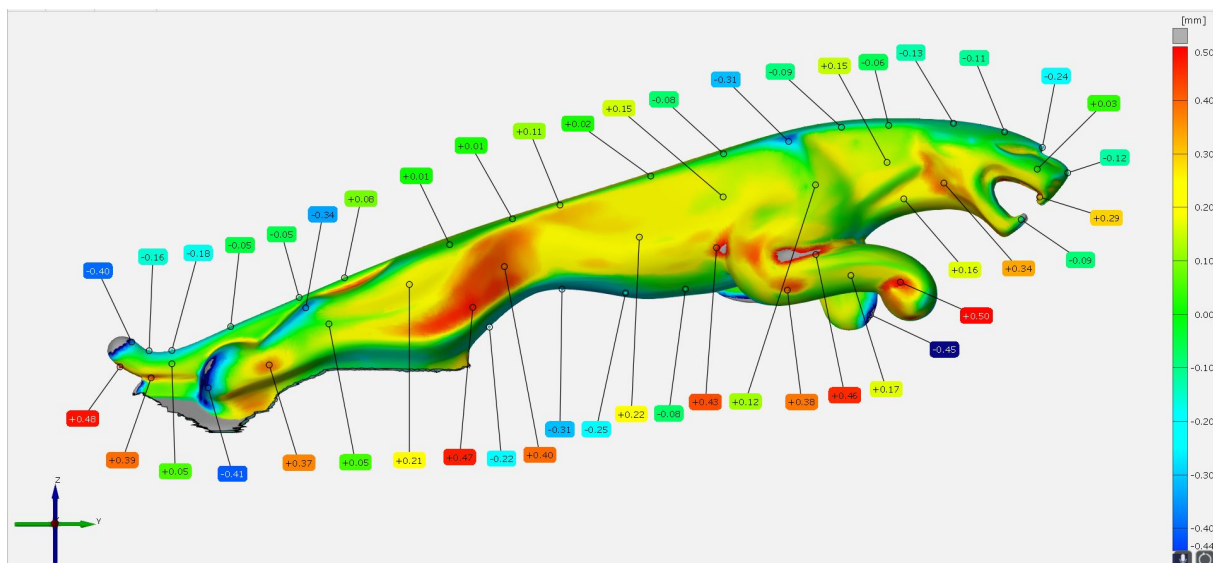


Obrázek 48: Rozměrová analýza tištěné finální sošky

11.4 Rozměrová analýza odlité finální sošky

Po dokončení rozměrové analýzy finální odlité sošky vůči CAD modelu bylo zjištěno, že největší odchylky se nacházely v oblasti slabin, ocasu, předních nohou, konce zadních noh a krční části. Tyto odchylky byly způsobeny chybou tisku, lakováním nebo tmelením.

Na obrázku 49 je znázorněny rozměrové odchylky povrchů tištěné sošky a CAD modelu.



Obrázek 49: Rozměrová analýza odlité finální sošky

11.5 Porovnání tištěné a odlité finální sošky

Po dokončení rozměrové analýzy bylo posouzeno, že odlitá finální soška se více shodovala s CAD modelem než vytištěná finální soška a to z důvodu většího zásahu dokončovacích operací (velký přídavek a odběr materiálu).

12 Zhodnocení výrobního procesu

3D skenování pomocí GOM Atos Compact 2 byl ideálním přístrojem pro zaznamenání celého povrchu zvoleného dílu. Z důvodu malých rozměrů a složitosti geometrie povrchu by nebylo vhodné použít dotykové skenery. Při skenování nebylo dobře vyřešené uchycení sošky ke skenovací podložce. Modelovací hmota použitá k uchycení nebyla vhodná, protože nebyla stabilní. Při otáčení automatického rotačního stolu se zkoumaný díl často bortil a nebyl ve statické rovnováze. Titanový prášek s alkoholem, který byl nanesen na sošku před skenováním se špatně čistil z referenčních bodů. Tyto problémy byly vyřešeny při skenování finálních sošek. Pro uchycení byl vyroben přípravek a jako náhradu titanového prášku byla použita sádra, která se lépe odstraňuje z referenčních bodů.

Pro vytvoření objemového tělesa byl využit počítačový program Catia, který se ukázal jako ideální nástroj pro řešení této problematiky.

Pro výrobu jader na odlévání pomocí tiskárny Anet A8 nebyl Master model FDM technologií vhodný. Tato nízko nákladová tiskárna nebyla absolutně vhodná, protože soška je malých rozměrů a velkých detailů. I po pokusu zbroušení povrchu se nepodařilo dosáhnout požadované drsnosti povrchu.

3D tisk technologií DPL byla vhodná pro výrobu Master modelu. ANYCUBIC Photon byla ideální pro tuto výrobu. Detaily vytištěné touto tiskárnou byly přijatelné pro replikovou výrobu, protože během tisku bylo dosahováno lepší povrchové struktury. Velkým nedostatkem této tiskárny byla doba tisku a nemožnost mísení výrobních materiálů.

Pro výrobu formy na odlévání byla použita modelovací hmota, která nebyla úplně ideální pro toto použití, neboť nebyla dostatečně tvárná a trhala se. Vytvářela na povrchu dělicí roviny trhliny. Důvodem těchto nedokonalostí bylo pravděpodobně stárnutí této hmoty. Další chybou ve výrobním postupu bylo vytvoření nedostatečně velké formy. To způsobilo defekty při odlévání z důvodu krátké vtokové soustavy. Materiál byl ze sošky vytrháván při odstraňování trychtýře pro usnadnění aplikace materiálu. Tento problém byl nakonec vyřešen pomocí trychtýře, který se neodstranil při tuhnutí, a tím prodloužil vtokovou soustavu. Po odlití byla na odlitku patrná dělicí rovina. Tento defekt byl způsoben nedostatečným stažením dvoudílné formy k sobě a špatného utěsnění.

Pro post processing bylo zvoleno manuální broušení pomocí brusných papírů různých drsností pod vodou. Tato technika byla ideální pro dokončovací úkony. Následně byl díl tmelen pomocí automobilových tmelů. Dalším úkonem bylo lakování, které probíhalo v lakovací komoře bez přístupu prachových částic a ostatních vnějších vlivů. Po nalakování povrchu byl díl umístěn do pece pro vytvrzení laku. Po nalakování se objevily nedostatky na povrchu. Na tištěném dílu byly defekty způsobeny špatným broušením a nanesením tmelu. Na povrchu odlitku bylo více defektů než na povrchu vytištěného dílu. Tyto defekty byly způsobeny špatným opracováním povrchu po odlití a nedostatečným vytmelením. Je možné, že defekty byly způsobeny již při výrobě formy. Nevýhodou výroby silikonových forem je, že se všechny nedostatky objeví ve formě. Dalším možným problémem mohl být špatný technologický postup. V laku se po vyndání objevily bublinky, což bylo způsobené pórovitostí odlitku. Také by se tento problém dal řešit nižší teplotou v komorové sušící peci nebo další variantou by bylo nechat sušit díl přirozenou cestou na vzduchu. Pro zredukování těchto vad byla do procesu zařazena technologie leštění. Tímto procesem byla odstraněna většina vad jako byly nedostatky na laku (tečení barvy a vrypy ve vrchní vrstvě laku).

12. ZHODNOCENÍ VÝROBNÍHO PROCESU

Pro rozměrovou analýzu byl zvolen počítačový program GOM Inspect, který byl ideální pro porovnání rozměru povrchu CAD modelu a finálních sošek.

Závěr

Tato práce byla zaměřena na výrobu prototypové sošky automobilové značky Jaguar na základě původní součásti zapůjčené z originálního automobilu s využitím technologie rapid prototyping a reverzního inženýrství. Původní originální díl byl vyroben ze zinkové slitiny. Při replikové výrobě nebylo nutné zachovat původní výrobní materiály, protože zvolená součást není funkční. Slouží pouze jako součást dekorativní.

S využitím reverzního inženýrství byla soška naskenována 3D skenerem a následně digitalizována pomocí softwaru Atos profesional, GOM Inspect. Dále pomocí softwaru Catia byla provedena úprava geometrie 3D modelu sošky a jeho následného převedení pro tisk. Pro výrobu sošky byly zvoleny technologie DLP a FDM, ale po srovnání těchto dvou technologií byla upřednostněna technologie DLP a to z důvodu lepší struktury povrchu. Tato vytištěná součást byla použita jako jádro pro výrobu silikonové formy. U vyrobených sošek byl proveden post processing. Následně byla provedena rozměrová analýza pomocí reverzního inženýrství 3D skenováním a porovnáním geometrií Master modelu a finálního výrobku v počítačovém softwaru GOM Inspect.

Jako finální výrobky byly zvoleny 2 modely, které byly lakovány. Z výsledku výroby byl odvozen závěr. Pryskyřice je možná pro nahrazení původního materiálu. Pro kusovou výrobu je ideální použít model, který byl vytištěn DLP technologií, ale pro malosériovou výrobu je nevhodný z důvodu časové náročnosti tisku a finanční náročnosti. Pro malosériovou výrobu je vhodná metoda odlévání pryskyřice do silikonové formy.

Struktura a vlastnosti povrchu jsou podobné jako u modelů vytištěných, avšak z rozměrové analýzy je patrné, že odlévaný model vykazuje menší rozměrové odchylky vůči Master modelu. Tyto odchylky jsou okem nezpozorovány a nemají vliv na celkový estetický vzhled.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] KAMRANI, Ali K. a Emad Abouel NASR. *Rapid prototyping: theory and practice*. New York: Springer, c2006. Manufacturing systems engineering series. ISBN 0-387-23290-7.
- [3] Solidvision. *3D skenování* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>
- [4] 3Dees. *Služby 3D skenování* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: https://www.3dees.cz/3d-skenovani?gclid=Cj0KCQjwsZ3kBRcNARIsAIuAV_QHDAVv99BIVHiZQAuTY4T4j6MrDsrbG0UG9aQgc9cqBdjQDgJKCkaAg8wEALw_wcB
- [5] MM Průmyslové spektrum. *Digitalizace: její princip a rozdělení* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [6] Bezkontaktní digitalizace. *Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/index.htm>
- [7] GOM. *ATOS Compact Scan* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.gom.com/>
- [8] HEXAGON. *Rádiová dotyková sonda RWP20.41* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: http://www.mh-inprocess.com/cs/mh-Radiova-dotykova-sonda-RWP2041_563.htm#.XJfvyJhKiUk
- [9] Evektor. *Rapid prototyping* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
- [10] Geodézie. *Laserové skenování* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.geodezieledec.cz/cs/laserove-skenovani/>
- [11] MM spektrum. *Laserový 3D skener Faro* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-skenovani-prenesení-reality-do-cad-systemu.html>
- [12] TSI System. *Ultrazvukové skenery* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.tsisystem.cz/nedestruktivni-zkouseni/ultrazvukove-skenery-0/>
- [13] TRIANGOLO. *Krautkrämer USM 25* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.triangolo.cz/vyrobní-možnosti/ultrazvukove-zkousky-vykovku.html>
- [14] ANAMNEZA. *Počítačová tomografie* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.anamneza.cz/vysetreni/CT-Cetecko-Cetecko-pocitacova-tomografie-vypocetni-tomografie-computed-tomogra>

- [15] REGIONZAPAD.CZ. *Wolf T 200* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.regionzapad.cz/zpravodajstvi/cheb-v-nemocnici-zahajil-provoz-novy-terapeuticky-rentgen-138814/>
- [16] BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [17] ANDREAS, Gebhardt a Hötter JAN-STEFFEN. *Rapid Prototyping. Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. NHanser Publishers, 2016, s. 1-1. ISBN 9781569905821. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hot-link/pdf/rcid:kpEGPROF13/id:kt010ZI6B1/additive-manufacturing/additive-m-rapid-prototyping?kpromoter=Summon>
- [18] VUT. *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [19] Prusa. *Pár tipů na 3D tisk a ukázka postprocessingu výtisků* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/ukazka-postprocessingu-vytisku/>
- [20] Trider. *Fotopolymery* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://trider.cz/material/fotopolymer>
- [21] ČVUT. *Technologie tisku* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://edux.fit.cvut.cz/courses/BI-3DT/tutorials/reprap/start>
- [22] ABC3D. *Technologie 3D tisku* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/sluzby-abc3d/tisk-na-zakazku>
- [23] 3Dnatives. *The Complete Guide to Electron Beam Melting 3D Printing (EBM)* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>
- [24] 3D Printing Media Network. *Arcam EBM Spectra H* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/ge-additives-new-arcam-ebm-spectra-h/>
- [25] MachineDesign. *How to Smooth 3D-Printed Parts* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>
- [26] Rudolf, Jiří: *SILIKONOVÉ FORMY A JEJICH VYUŽITÍ*. [Bakalářská práce] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 44 s.
- [27] *ZAŘÍZENÍ PRO VAKUOVÉ LITÍ DO SILIKONOVÝCH FOREM* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [28] YOUDE. *Silicone mold vacuum casting* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: http://www.youde-prototype.com/silicone-mold-vacuum-casting_d10
- [29] Albright Technologies. *Rapid Silicone Prototypes* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://albrightsilicone.com/prototype-silicone-molding/>

- [30] PKMODEL. *Technologie 3D tisku* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3Dtisk.html>
- [31] MCAE. *Vakuové lití* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/sluzby/vakuove-liti/>
- [32] Stratasys. *FDM technologie* [online]. [cit.2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-fdm/>

Seznam použitých zkratk a symbolů

3D	trojrozměrný
2D	dvourozměrný
CAD	Počítačem podporované projektování
RP	Rapid Prototyping
RE	Reverse Engineering
NC program	Číslicově řízený program
CNC stroj	Počítačem řízený obráběcí stroj
DLP	Digital Light Processing
SLA	Stereolitografie
SGC	Solid Ground Cutting
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
MJM	Multi Jet Modeling
EBM	Electron Beam Melting
LCD	Liquid Crystal Display
UV	Ultrafialové záření
ABS	Acrylonitril Butadién Styren
PLA	Bioplast
PETG	Polyethylentereftalát
.stl	souborový formát pro ukládání prostorových těles
tzv.	takzvaný